



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**APLICACIÓN DEL QUAL2K<sub>w</sub> EN LA MODELACIÓN DE LA  
CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO  
DE CALDAS, COLOMBIA**

APPLICATION OF QUAL2K<sub>w</sub> IN MODELING OF GUACAICA'S RIVER  
WATER QUALITY, DEPARTMENT OF CALDAS, COLOMBIA

MAYRA ANDREA CASTRO HUERTAS  
ESPECIALISTA EN INGENIERÍA AMBIENTAL – ÁREA SANITARIA

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química  
Manizales, Colombia  
Año 2015

# **APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA**

**MAYRA ANDREA CASTRO HUERTAS  
ESPECIALISTA EN INGENIERÍA AMBIENTAL-ÁREA SANITARIA**

Trabajo de profundización presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Magister en Ingeniería- Ingeniería Ambiental

Director (a):

Ph.D., Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga. UN de Colombia sede Manizales

Línea de Investigación:

Ambiental Área Sanitaria

Grupo de Investigación:

Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química

Manizales, Colombia

Año 2015

*A Dios, por su constante presencia en mi vida, por guiarme en el camino que me trajo hasta aquí y permitirme culminar esta etapa de mi vida.*

*A mis padres, por su infinito amor, por su apoyo incondicional, por brindarme la mejor educación y animarme siempre a buscar mi felicidad.*

*A mis hermanos, por estar siempre a mi lado y ser mis mejores amigos.*

*A todas las personas que estuvieron cerca de mí en este proceso y de una u otra forma me apoyaron, me orientaron y me dieron palabras de aliento en los momentos más difíciles.*

*A todos gracias...*

## RESUMEN

El estudio de los efectos en la calidad del agua de las corrientes mediante herramientas tales como los modelos de simulación de la calidad del agua, se requiere en forma intensiva en países como Colombia, esto debido a que la mayor parte de los recursos hídricos no cuenta con una adecuada planificación y los conflictos por los usos están presentes en la mayoría de ellos. Se presenta en este trabajo los resultados de la calibración y confirmación del modelo de calidad del agua QUAL2Kw en el río Guacaica, corriente ubicada en el departamento de Caldas, Colombia. La implementación del modelo estableció una línea base en términos de modelación de calidad de agua para esta corriente, y permitió formular un escenario de saneamiento futuro para evaluar la respuesta de la corriente ante el escenario planteado.

Palabras clave: modelación calidad del agua, modelo QUAL2Kw, calibración modelo calidad del agua, validación modelo calidad del agua, escenarios de modelación.

## **ABSTRACT**

The study of the effects in water quality of the streams, using tools such as simulation models of water quality, is required intensively in countries like Colombia, because most of the water resources has not a proper planning and conflicts for uses are present in most of them. The results of calibration and confirmation of QUAL2Kw in modeling of Guacaica's river water quality, stream located in the Department of Caldas, Colombia are presented in this work. The implementation of the model established a baseline in terms of water quality modeling for this stream, and allowed formulating a future scenario sanitation to evaluate the response of the stream .

Keywords: modeling water quality, model QUAL2Kw, calibration model water quality, validation model water quality, modeling scenarios.

# TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	10
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	12
3	OBJETIVOS .....	15
3.1	General .....	15
3.2	Específicos.....	15
4	MARCO TEÓRICO .....	16
4.1	Modelación de la calidad del agua .....	16
4.2	Descripción del QUAL2Kw .....	20
4.2.1	Generalidades del modelo .....	20
4.2.2	Balance de flujo.....	23
4.2.3	Balance térmico .....	23
4.2.4	Balance de masa .....	24
4.2.5	Modelo de reaireación.....	25
4.2.6	Datos de entrada y salida del modelo .....	26
4.2.7	Monitoreo de la calidad del agua .....	27
4.2.8	Fuentes puntuales y difusas.....	29
4.2.9	Constantes hidráulicas .....	29
4.2.10	Constantes cinéticas .....	30
4.2.11	Información meteorológica .....	31
4.2.12	Calibración del modelo.....	31
4.2.13	Confirmación del modelo.....	35
4.2.14	Aplicación del modelo para toma de decisiones .....	36
4.3	Descripción de la subcuenca del río Guacaica .....	36
4.3.1	Generalidades.....	36

4.3.2	Información existente .....	38
5	METODOLOGÍA .....	47
5.1	Datos de entrada del modelo .....	47
5.2	Monitoreo de la calidad del agua .....	48
5.3	Identificación de fuentes puntuales y difusas .....	49
5.4	Definición de constantes hidráulicas .....	50
5.5	Definición de constantes cinéticas a calibrar .....	51
5.6	Definición de variables meteorológicas .....	52
5.7	Calibración y confirmación .....	52
5.8	Planteamiento del escenario de saneamiento .....	54
6	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	57
6.1	Alimentación del modelo .....	57
6.2	Calibración y confirmación del modelo .....	61
6.3	Análisis del escenario de saneamiento .....	68
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	71
8	BIBLIOGRAFÍA .....	73
	ANEXOS 1: FICHAS DE CAMPO DE LOS PUNTOS DE MONITOREO .....	77
	ANEXOS 2: RESULTADOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS PARA LAS DOS CAMPAÑAS DE MONITOREO .....	90
	ANEXOS 3: RESULTADOS CALIBRACIÓN Y CONFIRMACIÓN PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS .....	97

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Descripción modelos comerciales de simulación de la calidad del agua .....	19
Tabla 2. Ecuaciones predictivas de las tasas de reaeración .....	25
Tabla 3. Constantes cinéticas para calibración.. .....	30
Tabla 4. Puntos de monitoreo de calidad del agua en el río Guacaica .....	38
Tabla 5. Puntos de monitoreo de calidad del agua en la quebrada Olivares .....	39
Tabla 6. Usos actuales sobre el río Guacaica.....	44
Tabla 7. Caudal de tributarios del río Guacaica. ....	45
Tabla 8. Aforo en los puntos de monitoreo del río Guacaica – Campaña Noviembre .....	46
Tabla 9. Aforo en los puntos de monitoreo del río Guacaica – Campaña Diciembre .....	46
Tabla 10. Datos de entrada del modelo .....	47
Tabla 11. Puntos de monitoreo en el río Guacaica .....	48
Tabla 12. Tributarios del río Guacaica .....	50
Tabla 13. Definición de constantes hidráulicas .....	51
Tabla 14. Constantes cinéticas para calibración .....	51
Tabla 15. Variables meteorológicas, datos medios mensuales.....	52
Tabla 16. Algoritmo genético para calibración .....	54
Tabla 17. Formulación del escenario de saneamiento .....	55
Tabla 18. Constantes calibradas para el río Guacaica.....	61
Tabla 19. Porcentaje de error en calibración y confirmación del oxígeno disuelto .....	65
Tabla 20. Porcentaje de error en calibración y confirmación de los sólidos suspendidos totales .....	67



## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de simulación de una corriente hídrica superficial.....	18
Figura 2. Esquema general del QUAL2Kw.....	22
Figura 3. Esquema del balance de flujo. ....	23
Figura 4. Esquema del balance térmico .....	24
Figura 5. Esquema del balance de masa.....	25
Figura 6. Esquema del proceso de calibración .....	32
Figura 7. Ubicación de la subcuenca del río Guacaica .....	37
Figura 8. Microcuencas de la subcuenca del río Guacaica .....	38
Figura 9. Ubicación puntos de monitoreo sobre el río Guacaica y la quebrada Olivares .....	40
Figura 10. ICA-CETESB río Guacaica 2012. ....	41
Figura 11. ICA-IDEAM río Guacaica 2012. ....	42
Figura 12. Mapa Calidad ICA-CETESB río Guacaica y quebrada Olivares .....	43
Figura 13. Mapa Calidad ICA-IDEAM río Guacaica y quebrada Olivares .....	43
Figura 14. Hoja de trabajo inicial del QUAL2Kw .....	57
Figura 15. Hoja de trabajo Headwater .....	58
Figura 16. Hoja de trabajo Reach .....	58
Figura 17. Hojas de trabajo de datos meteorológicos .....	59
Figura 18. Hoja de trabajo Point sources .....	59
Figura 19. Hoja de trabajo Rates .....	60
Figura 20. Hoja de trabajo WQ Data .....	60
Figura 21. Calibración y confirmación del caudal.....	62
Figura 22. Calibración y confirmación de la temperatura .....	63
Figura 23. Calibración y confirmación del oxígeno disuelto .....	64
Figura 24. Calibración y confirmación de la DBO rápida.....	66
Figura 25. Calibración y confirmación de los sólidos suspendidos totales .....	67
Figura 26. Calibración y escenario de saneamiento para tiempo seco de la DBO rápida.....	69
Figura 27. Confirmación y escenario de saneamiento para tiempo de lluvia de la DBO rápida .....	69
Figura 28. Calibración y escenario de saneamiento para tiempo seco de los SST .....	70
Figura 29. Confirmación y escenario de saneamiento para tiempo de lluvia de los SST .....	70

# 1 INTRODUCCIÓN

---

El estudio de los efectos en la calidad del agua de las corrientes mediante herramientas tales como los modelos de simulación de la calidad del agua, se requiere en forma intensiva en países como Colombia, esto debido a que la mayor parte de los recursos hídricos no cuenta con una adecuada planificación y los conflictos por los usos están presentes en la mayoría de ellos.

La autoridad ambiental en algunos casos ha tomado medidas ya sea para prevenir, mitigar o conservar el recurso hídrico en algunas regiones del país. Sin embargo, los cuerpos de agua en conflicto son numerosos y se necesita brindar las herramientas pertinentes a la autoridad competente para que ésta pueda llevar a cabo las acciones necesarias que influyan en los cuerpos de agua y los impacte de manera positiva.

En Colombia, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial –MAVDT formuló a través del Decreto 3930 del 2010, las pautas para el ordenamiento y manejo del recurso hídrico en el país. De acuerdo a la norma, uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta para realizar el correcto ordenamiento de las corrientes, es la aplicación y calibración de modelos de simulación de la calidad del agua.

La subcuenca del río Guacaica hace parte de la Cuenca hidrográfica del río Chinchiná en el Departamento de Caldas, se constituye en sí misma como un área estratégica para la conservación de la biodiversidad y el recurso hídrico. Es por esto que concretar su ordenamiento y reglamentación es de vital importancia. La Corporación Autónoma Regional de Caldas – Corpocaldas, como autoridad ambiental competente, inició el proceso de Ordenamiento y Reglamentación del río Guacaica en el año 2012, por lo cual es necesario contar con herramientas tales como los modelos de simulación de la calidad del agua que le faciliten ordenar y planificar de forma sostenible este recurso hídrico, de tal forma que se tomen las medidas pertinentes en pro de la recuperación y/o conservación del mismo.

Para modelar la calidad del agua de una fuente superficial, es necesario simular los diferentes procesos de transporte y degradación de los compuestos que son vertidos a la corriente. Para esto, se debe disponer de un software especializado y se debe contar con una serie de datos de campo de la corriente de interés. Uno de los modelos más ampliamente utilizados en el país es el QUAL2Kw, el cual es un software gratuito desarrollado

por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y se constituye como un modelo unidimensional que simula el impacto de cargas contaminantes puntuales y distribuidas en un flujo permanente, no uniforme.

Este trabajo presenta los resultados de la calibración y confirmación del modelo de calidad del agua QUAL2Kw para el río Guacaica, en el tramo comprendido entre el nacimiento del río en la vereda San Pablo del municipio de Neira, y su desembocadura en el río Chinchiná en la vereda Colombia del municipio de Manizales. El río Guacaica no contaba con información histórica de calidad del agua, por lo cual la calibración y confirmación del modelo se realizó a partir únicamente de la información de campo recopilada en dos campañas de monitoreo realizadas en el año 2012.

Los resultados de la implementación del modelo de calidad permitieron reflejar el estado actual de la corriente e identificar las zonas en las cuales la calidad del agua se ve fuertemente impactada. Se encontró que el río Guacaica presenta un aumento significativo en la concentración de los contaminantes en el tramo en el cual la quebrada Olivares descarga sus aguas. Esto se debe a que actualmente la quebrada Olivares es la receptora de las aguas residuales domésticas de los barrios del norte de la ciudad de Manizales, por lo cual su calidad se encuentra deteriorada e incrementa significativamente la concentración de los contaminantes en el río Guacaica en el tramo en el cual descarga sus aguas.

Adicionalmente la implementación del modelo permitió predecir la respuesta del río ante un escenario de saneamiento formulado, en el cual se contempló el mejoramiento de la calidad del agua de la quebrada Olivares gracias a la construcción de colectores que canalicen los vertimientos actuales de aguas residuales domésticas que se descargan sobre la quebrada, hasta la futura planta de tratamiento de aguas residuales de Manizales.

Los resultados de este trabajo establecen una línea base en términos de modelación de la calidad del agua para el río Guacaica. Sin embargo, se evidencia la necesidad de contar con campañas de monitoreo adicionales que permitan seguir ajustando las constantes cinéticas, de tal forma que se aumente la bondad del ajuste de la calibración del modelo, se pueda predecir más acertadamente el estado actual de la corriente y la respuesta de la misma ante distintos escenarios que se planteen.

## 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

Es bien conocido que por su localización geográfica, su orografía y una gran variedad de regímenes climáticos, Colombia se ubica entre los países con mayor riqueza en recursos hídricos en el mundo. Sin embargo, la población y las actividades socioeconómicas se ubican en regiones con baja oferta hídrica, cada vez es mayor el impacto de origen antrópico sobre el agua, y existe poca información que apoye la toma de decisiones en la planificación del recurso hídrico. Existen actualmente necesidades hídricas insatisfechas para todos los ecosistemas y la disponibilidad del recurso es cada vez menor (Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

En estimaciones realizadas por el IDEAM, la demanda para el desarrollo de las actividades socioeconómicas en Colombia se representa principalmente mediante los siguientes usos: agrícola (54%), doméstico (29%), industrial (13%), pecuario (3%) y servicios (1%). La calidad del agua es un factor que limita la disponibilidad de este recurso y restringe el rango de posibles usos, por este motivo es importante tener en cuenta que los ríos Colombianos no sólo tienen que satisfacer las diferentes demandas, sino que también reciben y transportan cargas de agua utilizadas en los diferentes procesos socioeconómicos que son vertidas mayoritariamente sin tratamiento previo. Además, también son los receptores de altos volúmenes de sedimentos originados por procesos de erosión, bien sea de origen natural o por acción del hombre (Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010; IDEAM, 2010).

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente y siendo evidente la problemática general del recurso hídrico a nivel nacional, se requiere ordenar el uso del recurso de manera sostenible. Para esto se requiere generar el conocimiento y la información que apoyen la toma de decisiones, la planificación, la gestión y el uso del recurso. Esto puede evitar que los sistemas y los procesos naturales sean intervenidos y alterados desordenadamente, se presente deterioro de las corrientes de agua y se incrementen los conflictos por su uso (IDEAM, 2010).

En Colombia, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial –MAVDT, encargado de definir y formular las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, entre ellos el agua, formuló a través del Decreto 3930 del 2010, las pautas para el ordenamiento y manejo del recurso hídrico en

el país. De acuerdo a la norma uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta para realizar el correcto ordenamiento de las corrientes, es la aplicación y calibración de modelos de simulación de la calidad del agua. Los cuales permiten determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables. La implementación de estos modelos permite además evaluar escenarios futuros de recuperación, por lo tanto se convierten en herramientas fundamentales para elaborar una correcta planificación de las fuentes de agua.

Uno de los modelos de calidad del agua más ampliamente utilizados en el mundo es el modelo matemático QUAL2Kw, el cual ha sido implementado por varios autores en diferentes corrientes superficiales (Arroyave et.al., 2012; Chihhao et.al., 2009; Corporación Autónoma Regional del Cauca CAR, 2012; Pelletier, et.al., 2003), el atractivo del modelo consiste en que permite modelar una gran cantidad de parámetros de calidad del agua y es un software gratuito. El modelo unidimensional QUAL2Kw simula el impacto de cargas contaminantes puntuales y distribuidas en un flujo permanente, no uniforme, segmentando el sistema en tramos que pueden ser de longitud variable. El balance hidrológico se representa a través del flujo; el balance de calor, a través de la temperatura, y el balance de materia, a través de la concentración de especies constituyentes. Los procesos cinéticos que se incluyen en el modelo son disolución, hidrólisis, oxidación, nitrificación, desnitrificación, muerte de microorganismos, respiración/excreción y fotosíntesis. Los procesos de transferencia de masa incluidos son re-aireación, sedimentación, demanda béntica de oxígeno y flujo de carbono orgánico de los sedimentos (Arroyave et.al., 2012).

La Subcuenca del río Guacaica se encuentra ubicada en la vertiente occidental de la Cordillera Central, en la región centro sur del departamento de Caldas y comprende parcialmente los municipios de Manizales y Neira. El río Guacaica hace parte junto al río Chinchiná y Río Claro de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná, la cual es considerada una de las cuencas más importantes del departamento de Caldas, debido a que en esta zona se ubica la capital del departamento y por consiguiente se concentran la mayoría de las actividades económicas.

En relación a lo anterior, la subcuenca del río Guacaica conlleva desde el punto de vista de la demanda de agua y de los vertimientos en sus cuerpos de agua, importantes conflictos de uso del recurso y de afectación de su calidad. Los principales aspectos están asociados al beneficio del café y a descargas de aguas residuales domésticas e industriales, que deben resolverse por la vía de la ordenación y la reglamentación del recurso hídrico. La Corporación Autónoma Regional de Caldas - Corpocaldas, como entidad encargada de administrar

el medio ambiente y los recursos naturales en el departamento de Caldas, mediante la resolución N° 358 del 24 de julio del 2012 declaró en Ordenamiento y Reglamentación los cuerpos de agua que integran la subcuenca del río Guacaica - Cuenca del río Chinchiná, jurisdicción de los municipios de Manizales y Neira.

Para llevar a cabo el ordenamiento de la subcuenca de acuerdo a lo establecido en la normatividad, la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales se encargó de recopilar la información histórica existente para el ordenamiento de la subcuenca. Sin embargo, encontró que la información era deficiente, no existían monitoreos de calidad del agua en la corriente principal y por consiguiente no se había implementado ningún modelo de simulación. Debido a lo anterior, la Universidad realizó dos campañas de monitoreo de cantidad y calidad del agua en el año 2012 en el río Guacaica, de tal forma que se pudiera contar con la información necesaria para el ordenamiento de la subcuenca.

Se evidencia entonces la necesidad de implementar un modelo de simulación de la calidad del agua calibrado y confirmado para apoyar el proceso de ordenamiento de la subcuenca, que permita no solamente representar el estado actual del río Guacaica y formular escenarios futuros de recuperación, sino también que establezca una línea base para futuras modelaciones de la corriente.

## 3 OBJETIVOS

---

### 3.1 General

Implementar el modelo matemático de simulación de la calidad del agua QUAL2Kw en el río Guacaica, con el fin de elaborar una herramienta que facilite el Ordenamiento del Recurso Hídrico del que trata el Artículo 6 del Decreto 3930 del 2010.

### 3.2 Específicos

- Calibrar y confirmar el modelo de calidad del agua QUAL2Kw en el río Guacaica, a partir de la información de dos campañas de monitoreo realizadas en el año 2012.
- Evaluar los efectos en la calidad del agua del río Guacaica para un escenario de saneamiento probable, mediante la aplicación del modelo de simulación QUAL2Kw.

### 4.1 Modelación de la calidad del agua

El comportamiento de los contaminantes en el agua es esencialmente dinámico, pues los contaminantes están en permanente movimiento, ya sea por efecto del propio movimiento del agua, o por la movilidad natural de las moléculas y partículas coloidales. Los fenómenos de transporte de contaminantes en cuerpos de agua han sido ampliamente estudiados y han dado origen a numerosas formulaciones matemáticas que describen su comportamiento (Castillo G., 2008). En la actualidad existe un sin número de modelos matemáticos, desarrollados con la finalidad de estudiar el comportamiento de un determinado contaminante o un grupo de éstos a lo largo de una corriente natural (García Q., 2008). Por este motivo, ha sido necesario clasificar los diferentes modelos de calidad del agua existentes de acuerdo a sus características para una mejor comprensión y selección de los mismos como puede verse a continuación (Lozano G. et al., 2003):

- Tipos de procesos: Físicos, químicos, biológicos
- Tipo de método de solución: Métodos empíricos, soluciones aproximadas, análisis simplificado, modelos matemáticos con diferencias finitas.
- Tipo de cuerpo de agua: Río, lago, reservorio.
- Dimensión: 1, 2 o 3 dimensiones.
- Estado: Estacionario, dinámico, cuasi-dinámico.
- Tipo de transporte: Advección, dispersión, intercambio béntico.
- Tipo de cuenca: Urbanas, no urbanas.

Comúnmente, la selección del modelo a implementar depende de la disponibilidad de información con que se cuenta, el propósito de la modelación y los procesos a modelar. Esta condición implica que no siempre un modelo puede aplicarse en el estudio de la calidad del agua en una corriente en particular. Sin embargo, se espera que un modelo de calidad del agua cuente con las siguientes características generales (Lozano G. et al., 2003):



- Simulación de los parámetros básicos de calidad de agua como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno y fósforo, principalmente. Además, el modelo debe considerar la reducción de la concentración de contaminantes por el efecto de entradas de flujo adicionales.
- Flexibilidad. Es decir que pueda adaptarse a las condiciones de diferentes corrientes, puesto que sería algo no viable económica y técnicamente utilizar un modelo de simulación diferente para cada corriente.
- Aplicabilidad. Se prefieren los programas que hayan sido empleados en otras regiones similares a la de aplicación del modelo.
- Simplicidad en su ejecución y precisión en sus resultados. Un modelo con entradas de datos o procesos más complejos, necesariamente no es más preciso.
- Viabilidad económica. No se justifica hacer una gran inversión para un programa que tendría casi los mismos resultados de un programa más económico.
- Articulación de información existente de calidad del agua, hidrométrica e información meteorológica.

El proceso general de simulación de una corriente hídrica superficial (Figura 1) inicia con la identificación de las necesidades de la corriente a modelar y sigue con la etapa de selección del modelo. En esta etapa se puede elegir uno de los modelos existentes o se puede desarrollar uno nuevo. Posteriormente se inician las etapas de aplicación, calibración y confirmación del modelo, las cuales permitirán finalmente predecir la calidad del agua de la corriente y tomar las medidas pertinentes, contando con una herramienta de planificación futura.

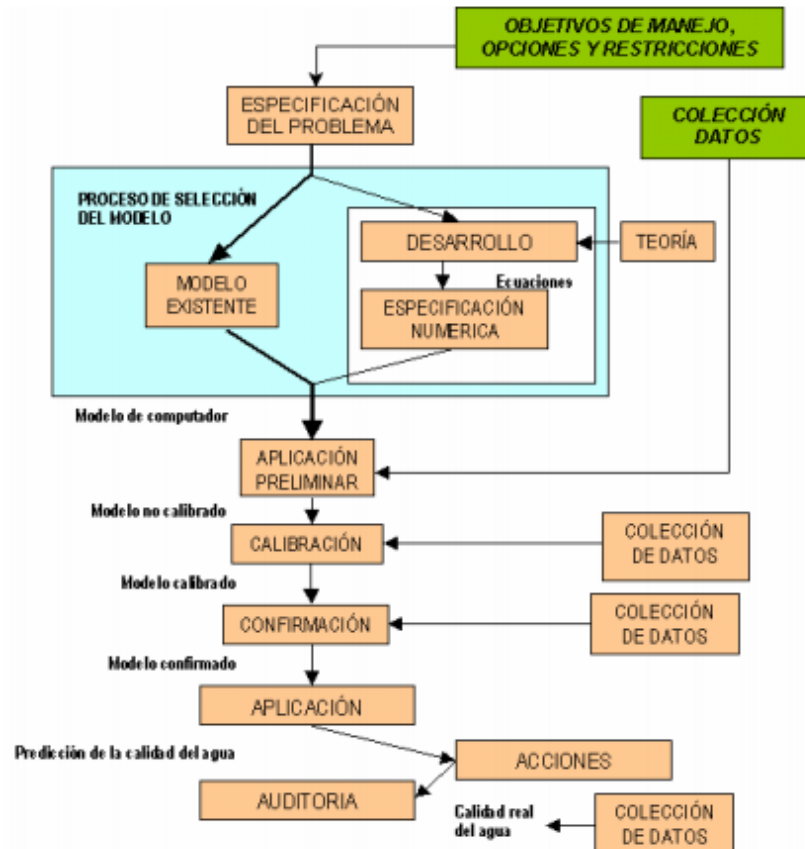


Figura 1. Proceso de simulación de una corriente hídrica superficial. (Lozano G. et al., 2003)

Entidades como la Agencia de Protección Ambiental (EPA), perteneciente al gobierno de los Estados Unidos, han desarrollado una serie de modelos matemáticos mediante los cuales se puede estudiar el comportamiento de la calidad del agua en una fuente natural. Entre los modelos desarrollados por esta entidad se pueden mencionar: WASP (Water Quality Analysis Simulation Program), QUAL2K y QUAL2Kw (Water Quality Model), entre otros. Otras instituciones de reconocimiento internacional también se han preocupado por el estudio y desarrollo de este tipo de herramientas, tal es el caso del Instituto de Hidráulica Danés, (DHI por sus siglas en inglés: Danish Hydraulic Institute), quien en 1999 desarrolló el modelo MIKE11; el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), agencia especializada de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), a través de su División de Salud y Ambiente (HEP), desarrolló el modelo de calidad del agua RIOS en 1995 (García Q., 2008). Finalmente, otro software muy utilizado para modelar la calidad del agua en corrientes superficiales es el modelo Quality Simulation Along River Systems (QUASAR, Whitehead et al., 1997). En la Tabla 1 se presenta una descripción general de cuatro de los modelos más utilizados en el mundo mencionados anteriormente.

Tabla 1. Descripción modelos comerciales de simulación de la calidad del agua

Modelo	Características
QUASAR	<p><b>Descripción:</b> Este software modela un río como una serie de tramos definidos por confluencias de tributarios, vertederos, tomas públicas de abastecimiento de agua o descargas de efluentes, y puede ser corrido en dos modos diferentes: modo planificación y modo dinámico.</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Caudal, amoníaco, pH, nitratos, temperatura, E. Coli, demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto, contaminante conservativo o trazador.</p> <p><b>Implementado en:</b> Cuenca el Virrey (Colombia).</p> <p><b>Desarrollado por:</b> Whitehead, P.E., William, R.J. and Lewis, D.R., 1997.</p>
MIKE 11	<p><b>Descripción:</b> Este modelo simula los procesos de reacción de sistemas multicompuestos incluyendo la degradación de la materia orgánica, la fotosíntesis y respiración de las plantas, la nitrificación y el intercambio de oxígeno con la atmósfera. El modelo se acopla al modelo básico de advección - dispersión AD, lo cual significa que el modelo simula los procesos de transformación de diferentes compuestos y el modelo AD es utilizado para simular los procesos de transporte simultáneamente</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Temperatura, oxígeno disuelto, materia orgánica (DBO), amoníaco/amonio, fósforo, nitratos, coliformes totales y fecales.</p> <p><b>Implementado en:</b> Río Cauca (Colombia), río Magdalena (Colombia).</p> <p><b>Desarrollado por:</b> Instituto de Calidad del Agua de Dinamarca (DHI), 1999.</p>
RIOS	<p><b>Descripción:</b> Este modelo proporciona un método estándar, basado en la ciencia para el manejo de cuencas en contextos en todo el mundo; combina datos biofísicos, sociales y económicos para ayudar a los usuarios a identificar las mejores ubicaciones para la protección y las actividades de restauración con el fin de maximizar el retorno de la inversión ecológica, dentro de los límites de lo que es socialmente y políticamente factible.</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Oxígeno disuelto, DBO carbonácea y nitrogenada, coliformes y análisis simplificados de sustancias tóxicas conservativas y no conservativas</p> <p><b>Implementado en:</b> Río Acelhuate, Sucio, y Suquiapa (El Salvador).</p> <p><b>Desarrollado por:</b> Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 1995.</p>
QUAL2Kw	<p><b>Descripción:</b> El QUAL2Kw es un modelo gratuito de calidad el agua que tiene la capacidad de simular una corriente principal y tres corrientes secundarias, las cuales pueden ser manejadas de manera independiente o integrarse a la corriente principal dependiendo de las necesidades del usuario.</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto, DBO rápida, DBO lenta, nitrógeno orgánico disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton, detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal.</p> <p><b>Implementado en:</b> Río Cauca, río Bogotá, río Chinchiná, quebrada Manizales, río Palo, río Sinú, río Aburrá (Colombia).</p> <p><b>Desarrollado por:</b> Chapra y Pelletier para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), 2008.</p>

## 4.2 Descripción del QUAL2Kw

### 4.2.1 Generalidades del modelo

El modelo de calidad del agua QUAL2K fue desarrollado para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos por Chapra y Pelletier en el año 2003, posteriormente fue mejorado en el año 2008 y recibió por nombre QUAL2Kw. La nueva versión del modelo tiene la capacidad de simular una corriente principal y tres corrientes secundarias, las cuales pueden ser manejadas de manera independiente o integrarse a la corriente principal dependiendo de las necesidades del usuario. Algunas de las características más representativas del modelo se describen a continuación (Chapra et.al., 2008):

- **Tipo de software e interface gráfica:** El modelo se ejecuta en ambiente Windows mediante el lenguaje Visual Basic. La interface gráfica funciona bajo el software Excel, lo que hace el modelo muy amigable y de fácil uso.
- **Segmentación del modelo:** El modelo no presenta limitaciones en la especificación del número y longitud de tramos que se pueden modelar, por lo cual se pueden incluir múltiples fuentes puntuales o dispersas en cualquier tramo.
- **Dimensionalidad:** El QUAL2Kw es un modelo unidimensional en la dirección del flujo, esto es debido a que en la mayoría de los ríos las dimensiones de la longitud son mucho mayores a las profundidades y anchos. Adicionalmente se asume que el río o canal se encuentra bien mezclado tanto vertical como horizontalmente.
- **Hidrodinámica:** El flujo de agua se simula en condiciones hidráulicas estables, esto quiere decir en condiciones de flujo permanente, simulando periodos de caudal y cargas constantes en el tiempo.
- **Modelación de sistemas hídricos de tipo dendrítico:** El modelo permite realizar simulaciones en casos donde la simulación se extiende no solo a la corriente principal, sino también a tributarios. El modelo tiene capacidad de simular en total cuatro (4) corrientes superficiales de manera independiente o integrada al ramal principal dependiendo de las necesidades del usuario.
- **Variación diurna del calor:** El calor del volumen de agua y la temperatura son simulados como función de aspectos meteorológicos en una escala de variación diurna.
- **Cinética diurna de la calidad del agua:** Todas las variables de la calidad del agua son simuladas en escala de tiempo diurna, aunque el modelo funciona en flujo permanente, tiene la opción de trabajo en la modalidad de un modelo cuasi-dinámico.

- **Entradas de masa y calor al sistema:** Se simulan vertimientos y extracciones tanto puntuales como dispersas.
- **Parámetros modelados:** Conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto, DBO rápida, DBO lenta, nitrógeno orgánico disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton, detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal.
- **Especies de DBO carbonácea:** El modelo QUAL2Kw usa dos formas de DBO carbonácea para representar el carbono orgánico. Estas formas son: la DBO de rápida oxidación (DBO fast) y la DBO de lenta oxidación (DBO slow). Adicionalmente, se simula la materia orgánica particulada (Detritus), este material de detritus está compuesto por partículas de carbón, nitrógeno y fósforo en una estequiometría fija.
- **Patógenos:** Se modela un patógeno genérico (coliformes fecales o coliformes totales). La remoción de patógenos está determinada como función de la temperatura, la luz y la sedimentación.
- **Algas en el fondo (periphyton o plantas radiculadas fijas):** El modelo tiene un módulo completo de modelación de crecimiento de phytoplankton (plantas flotantes) y de periphyton y macrófitas (plantas radiculadas fijas) y simula explícitamente las formaciones de algas en el fondo. Los modelos de crecimiento son función de la disponibilidad de nutrientes (fósforo y nitrógeno), de la temperatura, y de la intensidad de luz que penetra en el cuerpo de agua. Esta última a su vez es función de la radiación solar incidente y de la turbidez del agua
- **Interacciones agua-sedimento.** Los flujos en la interfase agua-sedimento de OD y nutrientes se simulan internamente en el modelo. De esta forma el flujo de demanda béntica (SOD) y de nutrientes son simulados como función de la sedimentación de materia orgánica particulada, reacciones dentro de los sedimentos, y de concentraciones de las formas solubles en la columna de agua.

Como se describió anteriormente, el modelo tiene unas características que le conceden muchas ventajas frente a otros modelos, sin embargo, el QUAL2Kw también presenta algunas limitaciones que se mencionan a continuación (Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, 2011):

- El modelo no es muy flexible y por tanto se encuentra algo limitado en cuanto a los parámetros y procesos que pueden ser simulados. Por ejemplo, no se incluye la degradación de hidrocarburos. Los vertidos de derivados del petróleo no pueden modelarse.

- El modelo es unidimensional y por tanto asume que el río tiene una mezcla perfecta lateral y vertical. Esta es una asunción razonable para la mayoría de los ríos, excepto cuando los ríos son particularmente anchos, profundos o tienen un movimiento lento. En estos casos debería considerarse un modelo bidimensional.

La esquematización del modelo matemático de simulación QUAL2Kw corresponde a la representación de las características del sistema que se requiere modelar. En el caso de la modelación en corrientes superficiales dicha representación se refiere a las características hidrogeométricas y la definición de las fronteras del modelo (fronteras internas y externas). Las fronteras externas corresponden a las estaciones de monitoreo ubicadas aguas arriba y aguas abajo del tramo en estudio, mientras que las fronteras internas corresponden a los ríos tributarios, las extracciones y los vertimientos para los cuales se dispone de información de caudales y calidad del agua. En el momento de seleccionar los tramos entre las estaciones se debe tener en cuenta que las propiedades físicas e hidráulicas (sección transversal, pendiente de la corriente, rugosidad etc), químicas y biológicas permanecen constantes a lo largo de cada tramo (Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC, 2012). En la Figura 2 se puede observar el esquema general del modelo QUAL2Kw con sus fronteras externas e internas.

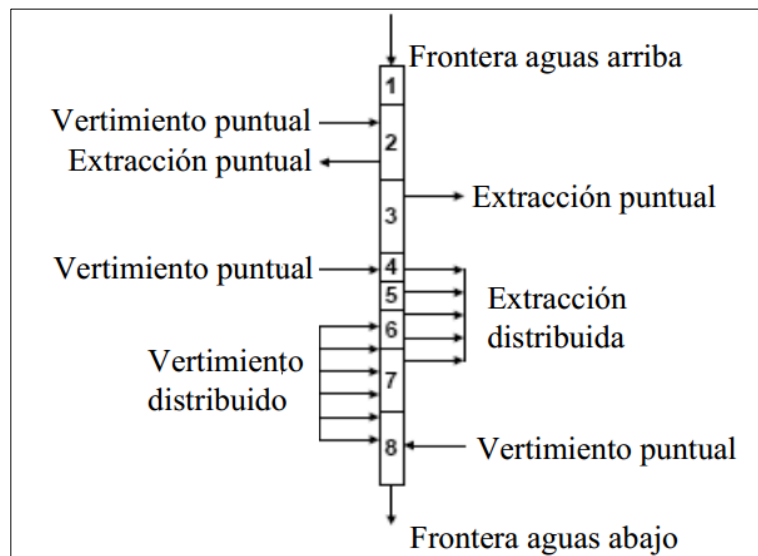


Figura 2. Esquema general del QUAL2Kw. (Chapra et.al., 2008)

En el modelo QUAL2Kw el tramo de la corriente estudiada se divide en una sucesión de pequeños subtramos o elementos computacionales que operan como reactores completamente mezclados. Para cada elemento computacional se realiza un balance hidrológico en términos del caudal, un balance térmico en términos de la

temperatura y un balance de masa en términos de la concentración de cada compuesto. Se tienen en cuenta procesos de transporte (advección y dispersión), fuentes externas (descarga de agua residual o extracciones de agua) y fuentes internas (demanda béntica o transformaciones bioquímicas). Las ecuaciones de balance resultante se resuelven para el caso de flujo permanente con un método clásico de diferencias finitas implícito. Los resultados finales se traducen en curvas que muestran la variación de los parámetros modelados a lo largo de la corriente (Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC, 2012).

## 4.2.2 Balance de flujo

El modelo QUAL2Kw trabaja bajo régimen estacionario, o sea que el flujo entrante y saliente en cada uno de los elementos computacionales en análisis se mantiene constante a través del tiempo (Ecuación 1). El esquema del balance de flujo se puede ver en la Figura 3 (Chapra et.al., 2008).

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{ab,i} \quad (1)$$

En donde,  $Q_i$ : Caudal de salida del elemento computacional;  $Q_{i-1}$ : Caudal de entrada del elemento computacional;  $Q_{in,i}$ : Caudal de entrada neto lateral por fuentes puntuales y difusas;  $Q_{out,i}$ : Caudal de salida neto lateral por fuentes puntuales y difusas.

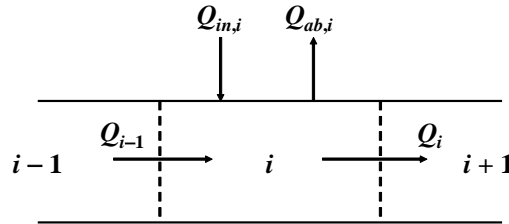


Figura 3. Esquema del balance de flujo. (Chapra et.al., 2008)

## 4.2.3 Balance térmico

El balance de calor o de temperatura en cada uno de los elementos que conforman el sistema es función de la transferencia de calor de los elementos adyacentes, de la transferencia de calor entre los sedimentos, el agua y la atmósfera, de las entradas y salidas externas al sistema (Ecuación 2). El esquema del balance de temperatura se puede ver en la Figura 4 (Chapra et.al., 2008).

$$0 = \frac{Q_{i-1}}{V_i} T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} T_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} T_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) + \frac{E'_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i) + \frac{W_{h,i}}{\rho_w * C_{pw} * V_i} \left( \frac{m^3}{10^6 cm^3} \right) + \frac{J_{a,i}}{\rho_w * C_{pw} * H_i} \left( \frac{m}{100cm} \right) + \frac{J_{s,i}}{\rho_w * C_{pw} * H_i} \left( \frac{m}{100cm} \right) \quad (2)$$

En donde,  $T_i$ : temperatura en el elemento  $i$ ;  $E'_i$ : coeficiente de dispersión del volumen entre los elementos  $i$  e  $i+1$ ;  $W_{h,i}$ : carga neta de calor de fuentes puntuales y no puntuales en el elemento  $i$ ;  $\rho_w$ : densidad del agua;  $C_{pw}$ : calor específico del agua;  $J_{a,i}$ : flujo de calor aire-agua;  $J_{s,i}$ : flujo de calor entre agua y sedimentos.

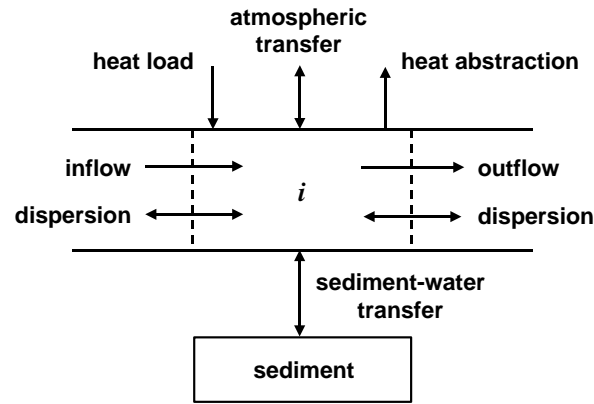


Figura 4. Esquema del balance térmico. (Chapra et.al., 2008)

#### 4.2.4 Balance de masa

El modelo QUAL2Kw considera por cada constituyente (parámetro fisicoquímico o biológico) un balance general de masa en cada elemento computacional (Figura 5), descrita mediante la Ecuación 3, la cual involucra los efectos de dispersión, dilución, consumo o generación de constituyentes por reacciones químicas o bioquímicas y la generación o pérdida de nutrientes por fuentes externas o internas (descargas puntuales, captaciones, etc) (Chapra et.al., 2008).

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \quad (3)$$

En donde,  $C_i$ : Concentración;  $Q_i$ : Flujo en el  $i$ ésimo segmento;  $Q_{ab}$ : Salida en el elemento  $i$  debido a extracción puntual o difusa;  $V_i$ : Volumen incremental del  $i$ ésimo segmento;  $t$ :Tiempo;  $S_i$ : Fuentes y sumideros del constituyente debido a reacciones y mecanismos de transferencia de masa;  $E_i$ : Coeficiente de dispersión longitudinal entre segmentos  $i$  y  $i+1$ ;  $S_i$ : Carga externa del constituyente en el elemento  $i$ .



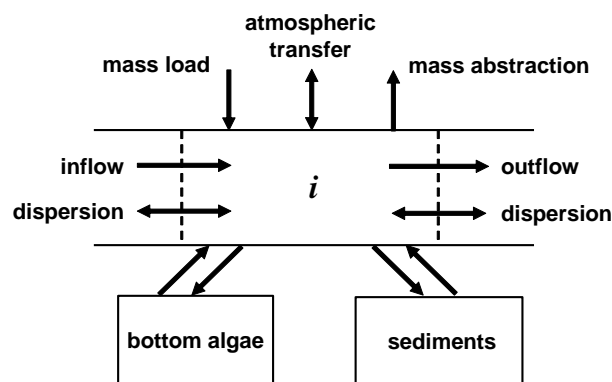


Figura 5. Esquema del balance de masa. (Chapra et.al., 2008)

#### 4.2.5 Modelo de reaireación

Las ecuaciones que permiten predecir el proceso de reaireación en los ríos están enfocadas a determinar la tasa de reaireación, también llamada coeficiente de reaireación ( $K_a$ ), la cual mide la velocidad a la que el oxígeno presente en la atmósfera es transferido a los cuerpos de agua (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2007). En la Tabla 2 se resumen las ecuaciones que predicen las tasas de reaireación en el QUAL2Kw, a partir de parámetros hidráulicos.

Tabla 2. Ecuaciones predictivas de las tasas de reaireación (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2007)

Ecuación	$K_a$ ( $d^{-1}$ a 20 °C)	Unidades
O'Connor y Dobbins (1958)	$K_a = 3.93 \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}}$ <p> <math>0.305 \text{ m} \leq H \leq 9.14 \text{ m}</math>  <math>0.15 \text{ m/s} \leq U \leq 0.49 \text{ m/s}</math>  <math>0.05 \text{ d}^{-1} \leq K_a \leq 12.2 \text{ d}^{-1}</math> </p>	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$
Churchill et al. (1962)	$K_a = 5.026 \frac{U^{0.969}}{H^{1.673}}$ <p> <math>0.61 \text{ m} \leq H \leq 3.35 \text{ m}</math>  <math>0.55 \text{ m/s} \leq U \leq 1.5 \text{ m/s}</math>  <math>0.000126 \text{ m/m} \leq S \leq 0.002351 \text{ m/m}</math>  <math>0.225 \text{ d}^{-1} \leq K_a \leq 5.56 \text{ d}^{-1}</math> </p>	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $S = \text{m/m}$
Owens et al. (1964)	$K_a = 5.34 \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$ <p> <math>0.122 \text{ m} \leq H \leq 3.35 \text{ m}</math>  <math>0.0305 \text{ m/s} \leq U \leq 1.52 \text{ m/s}</math>  <math>0.000156 \text{ m/m} \leq S \leq 0.0106 \text{ m/m}</math>  <math>0.31 \text{ d}^{-1} \leq K_a \leq 49.17 \text{ d}^{-1}</math> </p>	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $S = \text{m/m}$

Ecuación	$Ka$ ( $d^{-1}$ a 20 °C)	Unidades
	$Ka = 6.935 \frac{U^{0.73}}{H^{1.75}}$ $0.122 \text{ m} \leq H \leq 0.7315 \text{ m}$ $0.0305 \text{ m/s} \leq U \leq 0.549 \text{ m/s}$	
Tsivoglou y Neal (1976)	$Ka = 0.3609 \frac{\Delta H}{t}$ para $0.028 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 0.28 \text{ m}^3/\text{s}$ $Ka = 0.1772 \frac{\Delta H}{t}$ para $0.708 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 85 \text{ m}^3/\text{s}$ $Ka = 13566 \frac{US}{H}$	$\Delta H = \text{m}$ $t = \text{d}$ $U = \text{m/s}$ $S = \text{m/m}$
Thackston y Dawson (2001)	$Ka = 0.000025 \left( 1 + 9F^{\frac{1}{4}} \right) * \frac{U}{H}$	$H = \text{m}$ $U = \text{m/s}$
USGS (pool-riffle)	$Ka = 517(US)^{0.524} * Q^{-0.242}$ para $Q < 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ $Ka = 596(US)^{0.528} * Q^{-0.136}$ para $Q > 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$	$U = \text{m/s}$ $Q = \text{m}^3/\text{s}$
USGS (Channel-control)	$Ka = 88(US)^{0.313} * D^{-0.353}$ para $Q < 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ $Ka = 142(US)^{0.333} * D^{-0.66} * W^{-0.243}$ para $Q > 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$	$U = \text{m/s}$ $Q = \text{m}^3/\text{s}$ $D = \text{m}$ $W = \text{m}$

#### 4.2.6 Datos de entrada y salida del modelo

El modelo QUAL2Kw se ejecuta en ambiente Windows mediante el lenguaje Visual Basic. La interface gráfica funciona bajo el software Excel, lo que hace el modelo muy amigable y de fácil uso. El libro de Excel contiene varias hojas de trabajo en las cuales se ingresan los diferentes datos de entrada del modelo y desde donde éste es ejecutado.

Cada hoja de trabajo tiene un nombre que identifica el tipo de información que contiene y que puede resumirse de la siguiente forma: parámetros fisicoquímicos y microbiológicos tomados en campo en las campañas de monitoreo, descripción de los tramos del río, constantes hidráulicas, los valores de las constantes cinéticas de calibración del modelo, condiciones meteorológicas (temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y sombra), y la información fisicoquímica correspondiente a fuentes puntuales y difusas como tributarios, captaciones y vertimientos (Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC, 2012; Chapra et.al., 2008).

En el modelo se usan colores en las celdas para identificar si la información debe ser ingresada por el usuario o si corresponden a resultados del programa:

- **Celdas azules:** corresponden a las variables de diseño y los valores de los parámetros que deben ser ingresados por el usuario.
- **Celdas amarillas:** son los datos medidos en campo que deben ser ingresados por el usuario. Estos datos posteriormente se muestran en las gráficas generadas por el modelo.
- **Celdas verdes:** corresponden a los resultados del modelo.
- **Celdas oscurecidas:** se usan para títulos y nomenclatura y no deben cambiarse.

Después de que el modelo QUAL2Kw ha efectuado los cálculos necesarios para poder realizar las corridas de simulación, se generan diferentes hojas electrónicas y gráficas con los resultados. En las gráficas resultantes se pueden comparar las curvas correspondientes al perfil de concentraciones de los diferentes parámetros estimados por el modelo a lo largo del río, con los datos medidos en campo en las estaciones de monitoreo (Área Metropolitana Valle de Aburrá, 2011).

#### 4.2.7 Monitoreo de la calidad del agua

Para implementar el modelo de calidad del agua QUAL2Kw es fundamental contar con datos históricos o recientes de campañas de monitoreo de calidad del agua en estaciones ubicadas sobre la corriente que se requiere modelar, de tal forma que sea posible realizar la calibración y confirmación de las constantes cinéticas que mejor representan las características de la corriente.

Para el modelo, las fronteras externas corresponden a las estaciones de monitoreo ubicadas aguas arriba y aguas abajo del tramo de estudio. El modelo permite ingresar los valores de calidad del agua medidos en la corriente de forma puntual, el valor medio de los datos medidos en un tiempo determinado y los valores mínimos y máximos observados para cada parámetro de calidad de agua en las estaciones monitoreadas (Vera, 2007).

El QUAL2Kw permite modelar los siguientes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: Conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto, DBO rápida, DBO lenta, nitrógeno orgánico disuelto,

nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton, detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal.

El QUAL2Kw usa dos formas para trabajar la demanda bioquímica de oxígeno carbonacea (DBOC), estas dos formas son la DBO rápida (BOD fast) que es la materia orgánica fácilmente oxidada por los microorganismos y la DBO lenta (BOD slow) que es la materia orgánica que es difícilmente biodegradable por la población bacteriana (Vera, 2007). Al modelo es necesario ingresar los valores de DBO rápida y DBO lenta en términos de DBO última, esto supone una dificultad teniendo en cuenta que actualmente la materia orgánica es medida en el laboratorio a 5 días (DBO<sub>5</sub>) por cuestiones de tiempo y presupuesto.

La DBO última o total es la medida hasta el agotamiento total de la materia orgánica total, lo que usualmente ocurre en un periodo de 20 días, esta oxidación se alcanza en dos etapas: en la primera se estabiliza la materia carbonácea y corresponde a la primera fase de la desoxigenación; mientras que en la segunda fase se oxidan los compuestos nitrogenados carbonáceos (Metcalf et.al., 1998).

La cantidad de oxígeno remanente en un tiempo determinado es la Demanda Bioquímica de Oxígeno a ese tiempo, esta medida de la DBO es proporcional a la cantidad de material orgánico biodegradable o sustrato. La velocidad de consumo de sustrato sigue una cinética de primer orden, lo cual matemáticamente se puede establecer de la siguiente manera (Pelletier et.al., 2004):

$$y_t = L_0 * (1 - e^{-K*t}) \quad (4)$$

Donde  $y_t$ : demanda bioquímica de oxígeno en un tiempo  $t$ ;  $L_0$ : DBO última;  $K$ : constante cinética de reacción;  $t$ : tiempo.

Experimentalmente se ha encontrado que la constante cinética de reacción para la DBO en aguas superficiales y residuales varía entre 0.05 y 0.3 d<sup>-1</sup>, estableciéndose que el valor más común es de  $K \approx 0.23$  d<sup>-1</sup>. Para aguas de otro tipo, como por ejemplo las aguas producidas por industrias  $K$  varía de 0.12 a 0.7 d<sup>-1</sup> (Pelletier et.al., 2004).

#### 4.2.8 Fuentes puntuales y difusas

Las fuentes de contaminación del agua se dividen en fuentes puntuales y fuentes difusas, la primera consiste en fuentes que entran al medio ambiente por un solo punto de entrada que se identifica fácilmente, mientras que las fuentes difusas son aquellas que se reparten en áreas más extensas. Las fuentes puntuales tienden a ser aquellas directamente identificadas por sus orígenes en actividades humanas y son descargadas por tuberías y alcantarillas a los cuerpos de agua (fábricas, plantas de tratamiento de aguas residuales, minas, pozos petroleros, etc). Las fuentes difusas por el contrario son relativamente más difíciles de identificar y controlar (Vertimiento de sustancias químicas, tierras de cultivo, lotes para pastar ganado, construcciones, tanques sépticos) (Manahan, 2006).

En el QUAL2Kw las fronteras internas del modelo corresponden a las fuentes puntuales (ríos, extracciones y vertimientos) y a las fuentes difusas (vertimientos no puntuales) para los cuales se dispone de información de caudales y calidad del agua ya que han sido previamente identificados en campo.

#### 4.2.9 Constantes hidráulicas

En un modelo de calidad es indispensable definir en forma correcta el componente hidráulico, ya que la velocidad media de la corriente, la pendiente del tramo, el ancho y la profundidad de la sección transversal, determinan la tasa de reaeración de la corriente y por lo tanto su capacidad de autodepuración, así mismo la velocidad del flujo determinan los tiempos de viaje o de residencia de los contaminantes en el tramo (Chapra et.al., 2008).

El QUAL2Kw tiene dos opciones para definir las constantes hidráulicas como se muestra a continuación, el primer método se conoce como Rating Curves y el segundo utiliza la fórmula de Manning. La elección de cualquiera de estos métodos depende de la información con la que se cuente y la confiabilidad de la misma.

- **Rating Curves:**

$$U = k * Q^m \quad (5)$$

$$H = c * Q^f \quad (6)$$

$$W = a * Q^b \quad (7)$$

$$c * k * a = 1 \quad (8)$$

$$f + b + m = 1 \quad (9)$$

Donde Q: caudal; U: velocidad; H: profundidad; W: ancho; k,c, a: constantes; f,b,m: coeficientes.

- **Manning Formula:**

$$Q = \frac{S_0^{1/2} A_c^{5/3}}{n P^{2/3}} \quad (10)$$

Donde Q: caudal; So: pendiente del fondo; Ac: área transversal; P: perímetro mojado; n: coeficiente de manning.

#### 4.2.10 Constantes cinéticas

El QUAL2Kw permite definir una gran cantidad de variables cinéticas para describir todas las reacciones que tienen lugar en la dispersión y la dilución de los contaminantes en una corriente de agua, sin embargo, aunque todas las variables se tienen en cuenta en la aplicación del modelo, es elección del usuario cuáles de estas variables desea calibrar. En la Tabla 3 se presentan las constantes cinéticas que permite calibrar el QUAL2Kw, la descripción de cada una de ellas y el rango de valores de calibración encontrados en la bibliografía a través de múltiples ensayos para cada constante (Chapra, 1997; Kannel et.al., 2007; Pelletier et.al., 2003). Los valores iniciales de las constantes cinéticas a calibrar pueden ser definidos por el usuario de acuerdo a experiencias en la región o lo puede asignar arbitrariamente siempre y cuando estén entre los rangos establecidos.

**Tabla 3. Constantes cinéticas para calibración. (Chapra, 1997; Kannel et.al., 2007; Pelletier et.al., 2003).**

Parámetro de calibración	Abreviación	Unidades	Rango de calibración
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos inorgánico	VS - SSI	m/d	0 – 2
Tasa de reaireación, descrita por la ecuación de reaireación	Ka	1/d	Auto- selección
Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO slow	1/d	0 – 4.2
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa oxidación DBO- DBO slow	1/d	0 – 4.2
Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	T. Oxidación DBO fast	1/d	0 – 5
Hidrólisis de nitrógeno orgánico	Hidrólisis NO	1/d	0 – 5
Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico	VS-NO	m/d	0.001 – 0.1
Tasa de nitrificación de amonio	Tasa Nitrificación	1/d	0 – 10
Tasa de desnitrificación de nitratos (importante cuando existen condiciones anaeróbicas)	Tasa Desnitrificación	1/d	0 – 2
Coefficiente de transferencia por desnitrificación de sedimentos	CT- Desnitrificación Sed.	m/d	0 – 1

Parámetro de calibración	Abreviación	Unidades	Rango de calibración
Hidrólisis del Fósforo Orgánico	Hidrólisis PO	m/d	0.001 – 0.7
Velocidad de sedimentación del Fósforo Orgánico	VS - PO	1/d	0 – 2
Velocidad de sedimentación del Fósforo Inorgánico	VS - PI	m/d	0 – 2
Hidrólisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Hidrólisis POM	m/d	0 – 5
Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Vel. Sedimentación POM	1/d	0 – 5
Tasa de decaimiento de los patógenos	Tasa Decaimiento Patógenos	1/d	0 – 2
Velocidad de sedimentación de los patógenos	VS - Patógenos	m/d	0 – 2
constante $\alpha$ para mortalidad de los patógenos por luz solar	Constante $\alpha$ Mortalidad - Patógenos	1/d per y/hr	0 – 1

#### 4.2.11 Información meteorológica

La información meteorológica necesaria para la implementación del modelo consiste en datos de temperatura, temperatura de punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad, sombra en el río producida por la topografía o vegetación y radiación solar (Chapra et.al., 2008). Estos datos y la temperatura del agua del río permiten realizar el balance de energía térmica para el cálculo de la temperatura del agua como se mencionó anteriormente. Esta información puede ser tomada en campo, se puede consultar la base de datos de la National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), o se pueden consultar estaciones meteorológicas existentes en la zona para obtener los valores correspondientes al día en el que se realizó el monitoreo de calidad del agua.

#### 4.2.12 Calibración del modelo

La calibración es un proceso iterativo encaminado a llevar a un margen de error mínimo la diferencia entre los datos simulados por el modelo y los valores medidos en campo para el mismo. En un modelo de calidad del agua se deben especificar las tasas de reacción o transformación de los determinantes de calidad del agua y tasas de transferencia de masa hacia o desde la superficie del agua y el fondo del canal. La cinética de las reacciones son particulares para cada tipo de río en las condiciones específicas que se presentan en el sistema físico modelado y las tasas de transferencia dependen en gran parte de la turbulencia de la corriente (Camacho et.al., 2003).

Las técnicas empleadas para encontrar las soluciones óptimas que permitan un error mínimo pueden basarse en algoritmos de optimización matemática integrados al modelo y a los resultados de sus corridas. Dentro de las técnicas de optimización matemática se pueden mencionar algunos procedimientos: amoebo, recocido

simulado, algoritmos genéticos y colonia de hormigas, cada uno con un proceso de convergencia, costo y eficiencia computacional diferente (Vera, 2007). En general, el algoritmo seleccionado debe permitir disminuir el error secuencialmente para que el modelo converga hacia soluciones admisibles para el mismo. En la Figura 6 se presenta el esquema del proceso de calibración que sigue el modelo de calidad del agua.

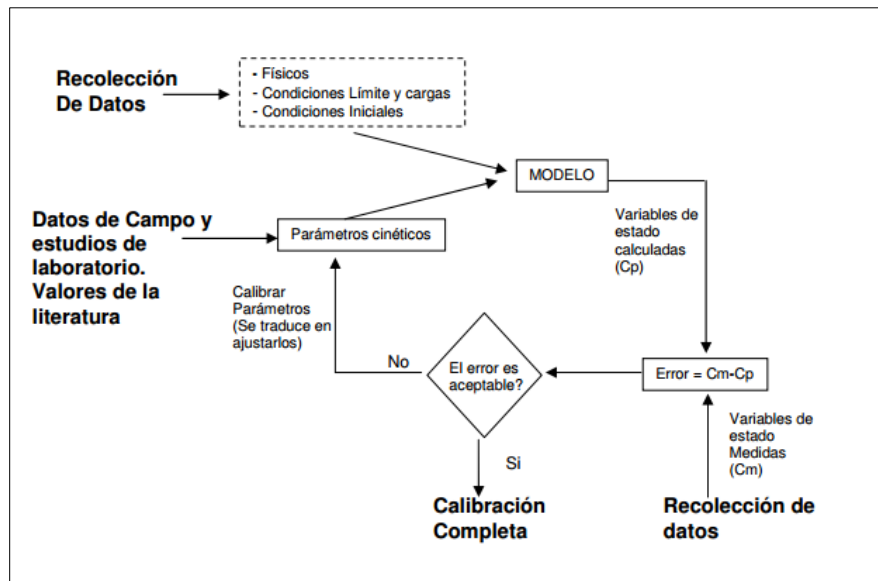


Figura 6. Esquema del proceso de calibración. (Pelletier et.al., 2005)

El modelo QUAL2Kw realiza la calibración automática de los parámetros cinéticos mediante el AG-PIKAIA, el cual es un algoritmo genético (AG) que funciona como un sistema de búsqueda a través de un espacio de decisión, usando un proceso análogo al de la “selección natural de las especies” de Darwin, que busca la supervivencia, en mayor número, de los individuos más aptos. De esta forma, el QUAL2Kw determina los valores óptimos de los parámetros cinéticos entre máximos y mínimos especificados para cada parámetro, buscando maximizar la bondad de ajuste con respecto a los datos de campo (Arroyave et.al., 2012).

Para iniciar el proceso de optimización las variables de entrada del algoritmo genético AG-PIKAIA en el modelo QUAL2Kw son:

- **Random number seed:** Semilla para la generación de las poblaciones iniciales en el generador de números aleatorios de Fortran. Puede introducirse cualquier valor entero real. Los números aleatorios generados están en un rango entre 0 y 1, y por ello debe introducirse rangos de variación de cada una de



las variables que se van ingresar para poder reescalarlos en los valores usados para la generación aleatoria (Vera, 2007).

- **Model runs in a population:** Corresponde al número de veces que corre el modelo en una generación. Representa el total de poblaciones de prueba que utiliza para cada generación. Se debe ingresar un número entero par, ya que si se ingresa un número entero impar el programa por defecto lo asume como el entero par anterior y realiza la corrida con ello. Puede introducirse hasta un máximo de 512 poblaciones (Vera, 2007).
- **Generations in the evolution:** Es el número total de generaciones en que se desarrolla la población (Vera, 2007).
- **Digits to encode genotype:** Corresponde al proceso de codificación del individuo utilizado para la población. Normalmente los algoritmos genéticos utilizan sistemas binarios para codificar los números susceptibles de calibración, esto se hace para generar un código único del individuo (asumido como el cromosoma del individuo) susceptible de cruzamiento en la siguiente generación y donde el padre deja su huella genética en la siguiente generación. Para el caso de PIKAIA este utiliza una codificación decimal es decir una variable susceptible de modificación será representada por números de 0 a 9 (ejemplo 0.235687 se representara como 235687) y este cambio se hace ya que no es muy fácil programar y manipular la codificación binaria en plataforma de Fortran. El máximo de dígitos para la codificación es de seis (Vera, 2007).
- **Crossover mode:** El operador de cruzamiento actúa sobre el par de cromosomas padres para producir un par de cromosomas descendientes que se originaran a través de la selección e intercambio de partes de los cromosomas padres. Hay diferentes tipos de cruzamiento: cruzamiento un-punto, dos-puntos y uniforme. En el cruzamiento un-punto y dos-puntos el operador intercambia partes del cromosoma en puntos aleatoriamente seleccionados de los dos parámetros padres. Ellos difieren en el número de cortes hechos en los cromosomas padres (Pelletier et. al., 2006). En el cruzamiento uniforme son los genes individuales seleccionados aleatoriamente de los dos parámetros padres para el intercambio y no partes del cromosoma . Adicionalmente, a estos tres modos de cruzamiento el modelo QUAL2Kw presenta las opciones de cruzamiento aritmético y modos híbridos de cruzamiento que son combinaciones de un-punto, dos-puntos, uniforme y aritmético (Chapra et. al., 2008).
- **Crossover probability:** Representa la probabilidad total de individuos susceptibles de cruzamiento, el valor estándar recomendado por múltiples autores es del 85% (0.85), esto quiere decir que por cada 100 individuos susceptibles de cruzarse se deben usar 85 de ellos para realizar el cruzamiento (Vera, 2007).

- **Mutation mode:** Representa la mutación posible que puede realizar el programa, se presentan básicamente cinco métodos de mutación, todos están basados en una tasa de modificación que es susceptible de modificación de acuerdo al ajuste o a la distancia sobre las respuestas obtenidas, o también este proceso se puede realizar con una tasa fija. La mutación es el factor que permite la existencia de diversidad de especie en la población en cada generación siguiente a la inicial de manera que pueda evitar la rápida convergencia de la misma a una solución que puede ser la incorrecta y que no pueda salir de allí (Vera, 2007).
- **Initial mutation rate:** Representa la tasa de mutación inicial en el caso que se usen planes de mutación diferentes a la tasa fija, si se utiliza la opción de tasa fija este será el valor de la tasa de mutación. Puede variar entre 0 y 1, pero se recomiendan valores bajos (Martínez, 2000) debido a que si se fijan valores altos el algoritmo puede degradarse y perder la convergencia inicial planteada.
- **Minimun mutation rate:** Representa el valor mínimo que puede asumir la tasa de mutación en caso de utilizar un método de mutación diferente al de la tasa fija. Puede variar entre cero y uno (Vera, 2007).
- **Maximun mutation rate:** Representa el valor máximo que puede asumir la tasa de mutación en caso de utilizar un método de mutación diferente al de la tasa fija. Puede variar entre cero y uno (Vera, 2007).
- **Relative Fitness Differential:** Se puede traducir como la presión de la selección, este parámetro indica cuanta ventaja supone tener una aptitud alta para ser elegido como padre. Cuando el valor es fijado en uno los individuos más aptos tienen las mayores ventajas para transmitir sus genes, mientras que cuando es fijado en cero se anula la presión de selección y los individuos serán elegidos al azar independiente de su aptitud eliminando así la componente de selección genética del algoritmo. Se recomienda usar el valor máximo de uno (Vera, 2007).
- **Reproduction Plan:** Es el plan de reproducción que el algoritmo debe usar. La selección de los individuos en el algoritmo PIKAIA se realiza por el método de la rueda de la ruleta "roulette wheel" usando el ajuste relativo obtenido para la población como una medida de la probabilidad de selección. Esto puede representarse como un juego de ruleta, en la cual cada individuo obtiene una sección de la ruleta y los individuos más aptos obtienen mayores secciones de la ruleta, luego la ruleta se hace girar y para en los individuos que va utilizar para realizar generaciones siguientes o crear hijos. Una vez definidos estos se debe seleccionar el método de reproducción a utilizar, que básicamente se divide en tres: En la primera alternativa se realiza un reemplazo total de la población, esto quiere decir que el total de hijos creados reemplaza al total de padres originales; la segunda alternativa se denomina selección aleatoria de eliminación; y la tercera eliminación de los peores, para estas dos últimas los planes de reproducción

difieren en los miembros de la población que se eliminan cuando la generación siguiente es incorporada (Vera, 2007).

- **Elitism:** Es una forma de conservar los individuos más aptos de una población de padres para que puedan pasar sin modificaciones a la generación siguiente. Si se coloca el valor de cero no se realizara elitismo, mientras si se coloca el valor de uno se realizará dicha preservación, que será únicamente ejecutada si se utiliza el segundo o tercer plan de reproducción (Vera, 2007).
- **Restart from previous evolution:** Si se selecciona el valor de cero, indica que todas las poblaciones iniciales para la corrida de autocalibración serán generadas de forma aleatoria cada vez que se corra, mientras si se selecciona el valor de uno, siempre el programa toma una población inicial como los valores que se presentan para las variables a calibrar que se encuentren dentro de la hoja electrónica al momento de realizar la calibración (Vera, 2007).

Otro factor importante para llevar a cabo la calibración del modelo, es definir el tipo de error que se quiere manejar, o la función objetivo a calibrar, esto se hace bajo dos aspectos (Vera, 2007):

- El primero de ellos obedece a la formulación matemática utilizada para el mismo, aquí se puede mencionar por ejemplo el error cuadrático medio que realiza una diferencia cuadrática de los datos observados contra los datos modelados. Para poderlo generalizar se realiza una sumatoria de estas diferencia puntuales que se estandariza entre la media de los datos usados para la calibración del mismo, o algún test de tipo estadístico que permita manejar un nivel de confianza para el modelo.
- El segundo esta definido en los rangos de error permitidos para que el modelo se aceptado como calibrado, o en los niveles de confianza sobre los cuales el modelo puede ser aceptado, esto es criterio del diseñador y debe estar fundamentado en una explicación racional del ajuste o nivel de confianza del mismo.

Esta función de error es programada de forma independiente dentro de la hoja "Fitness" del QUAL2Kw, todos los cálculos de la función objetivo se realizan de forma secuencial y el resultado se enlaza en la hoja de trabajo "Rates" para efectuar la calibración automática.

#### 4.2.13 Confirmación del modelo

En un modelo de calidad del agua es necesario evaluar la capacidad predictiva del modelo en condiciones hidrológicas y ambientales diferentes a las observadas en la calibración. Por este motivo, terminado el proceso

de calibración del QUAL2Kw y establecidos los valores de las constantes cinéticas que mejor representan las características de la corriente modelada, es necesario corroborar el ajuste manteniendo las constantes fijas y alimentando el modelo con nueva información en los puntos usados para calibración, de esta forma bajo rangos de error o ajustes estadísticos se acepta o no la confirmación del modelo (Vera, 2007).

#### **4.2.14 Aplicación del modelo para toma de decisiones**

El uso de modelos de calidad del agua ha ido ganando importancia como herramienta para contribuir a la planificación integral de los recursos hídricos, puesto que al contar con un modelo confiable calibrado y confirmado, éste puede ser usado para representar esquemas de gestión e intervención directa. De esta forma, se convierte en una herramienta útil de planeación que puede soportar la toma de decisiones en problemas específicos que se quieran solucionar y estén afectando la calidad del agua de una corriente específica (Vera, 2007).

Una vez calibrado y confirmado el modelo de calidad QUAL2Kw, se cuenta con una herramienta capaz de predecir la respuesta de la corriente ante distintos escenarios de intervención, para esto, se deben formular los escenarios de posibles soluciones, por ejemplo la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, la implementación de sistemas individuales de saneamiento o la implementación de las áreas de retiro que permitan mejorar la calidad del agua de la corriente afectada. Una vez se formulan los escenarios, se deben definir los valores de calidad de entrada del modelo y se modela nuevamente con estos valores.

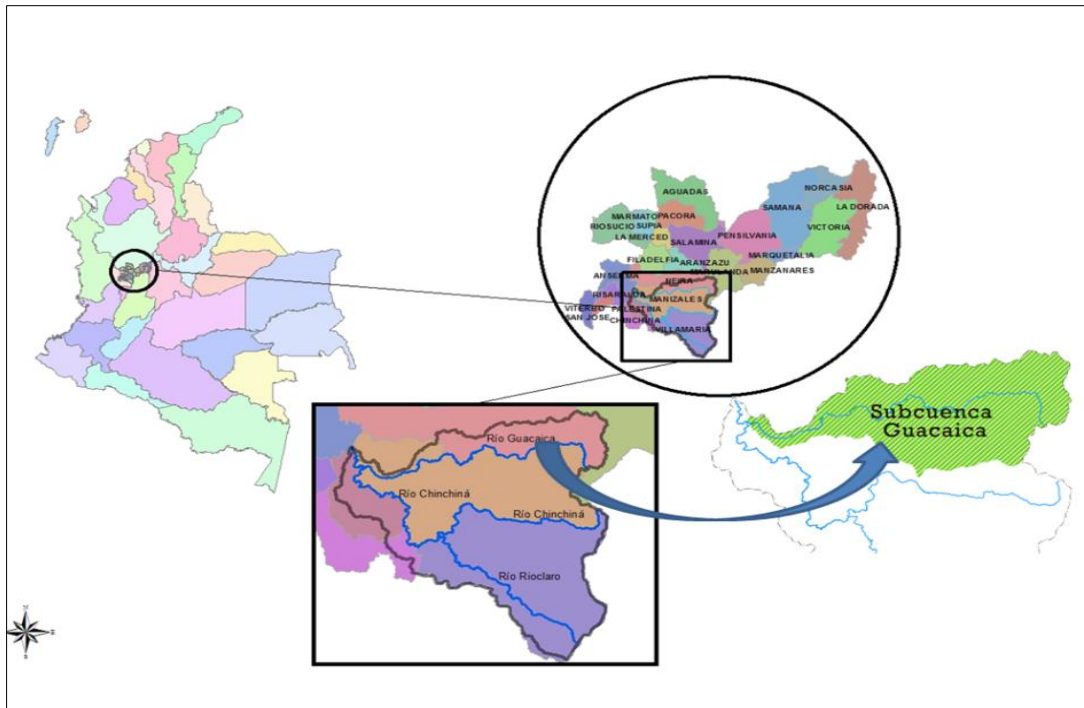
Es importante tener en cuenta que la toma de decisiones debe estar enfocada al monitoreo posterior a la realización de las medidas que se hayan tomado para solucionar el problema, y saber si el escenario de modelación tomado como base para tomar esa decisión, fue efectivo y tuvo el impacto esperado, o si el modelo debe ser ajustado (Vera, 2007).

### **4.3 Descripción de la subcuenca del río Guacaica**

#### **4.3.1 Generalidades**

La subcuenca hidrográfica del río Guacaica se encuentra ubicada en la vertiente occidental de la Cordillera Central, en la región centro sur del departamento de Caldas y comprende parcialmente los municipios de Manizales y Neira. La subcuenca tiene una extensión de 337.81 km<sup>2</sup> y limita al sur con la subcuenca del río Chinchiná, al oriente con el municipio de Marulanda, al norte con el municipio de Neira y al Occidente con el

municipio de Palestina (Figura 7). Las coordenadas planas de los extremos de la subcuenca con origen Bogotá son 862427,0E, 1066778,95N y 824031,60E 1049858,29N (IDEA UNAL, 2013).



**Figura 7. Ubicación de la subcuenca del río Guacaica. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

La parte alta de la subcuenca del río Guacaica se ubica a una altura máxima de 3882 m.s.n.m. en la zona denominada “Cuchilla del Burro”, mientras que su parte más baja se encuentra a una altura de 872 m.s.n.m en la zona plana del municipio de Manizales (Vereda Colombia). La subcuenca del río Guacaica se identifica con el Código 2615 y hace parte de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná, la cual pertenece a la zona Hidrográfica Magdalena-Cauca, es el afluente más importante del río Cauca por su margen derecha (IDEA UNAL, 2013).

El río Guacaica nace en un cañón profundo en la vereda San Pablo, finca la Esmeralda, en el municipio de Neira a una altura de 3776 m.s.n.m. Desemboca en la margen derecha del río Chinchiná a 872 m.s.n.m. en la vereda Colombia del municipio de Manizales, después de recorrer una longitud aproximada de 52,64 km. En la subcuenca del río Guacaica se tienen identificadas 22 microcuencas, entre las que se destacan el río Blanco y las quebradas Olivares, El Junco, Negra, Minarica, San Juan y San Pablo. El Río Blanco y la quebrada Olivares, son los afluentes más importantes para la ciudad de Manizales (IDEA UNAL, 2013). En la Figura 8 se presenta el mapa de la subcuenca con las 22 microcuencas identificadas.



**Figura 8. Microcuencas de la subcuenca del río Guacaica. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

### 4.3.2 Información existente

Corpocaldas como Autoridad Ambiental encargada de la Gestión Integral del Recurso Hídrico en el departamento de Caldas, mediante la resolución No. 358 del 24 de Julio de 2012 declaró en Ordenamiento y Reglamentación los cuerpos de agua que integran la subcuenca del Río Guacaica - Cuenca del Río Chinchiná, en jurisdicción de los municipios de Manizales y Neira, departamento de Caldas.

Con el fin de atender lo dispuesto en el artículo 6° del Decreto 3930 del 2010 referente al ordenamiento del recurso hídrico, el Instituto de Estudios Ambientales - IDEA de la Universidad Nacional Sede Manizales, realizó los estudios técnicos para respaldar el ordenamiento de la subcuenca del río Guacacia, para ello, realizó dos campañas de monitoreo en el año 2012, abarcando periodo seco y periodo de lluvia.

Se seleccionaron 8 estaciones de monitoreo sobre el río Guacaica con el fin de abarcar toda su extensión, en la Tabla 4. se detallan los puntos monitoreados, la distancia acumulada hace referencia al kilómetro sobre la corriente en la cual se ubicaron los puntos de monitoreo, teniendo en cuenta que el kilómetro 0 es la desembocadura del río Guacaica en el río Chinchiná.

**Tabla 4. Puntos de monitoreo de calidad del agua en el río Guacaica. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

Puntos de Monitoreo		Elevación (m.s.n.m.)	Distancia Acumulada (km)	Coordenadas	
				Longitud	Latitud
San Pablo	G1	3730	52.64	860088	1063940
Río Blanco	G2	3616	44.33	857092	1057480

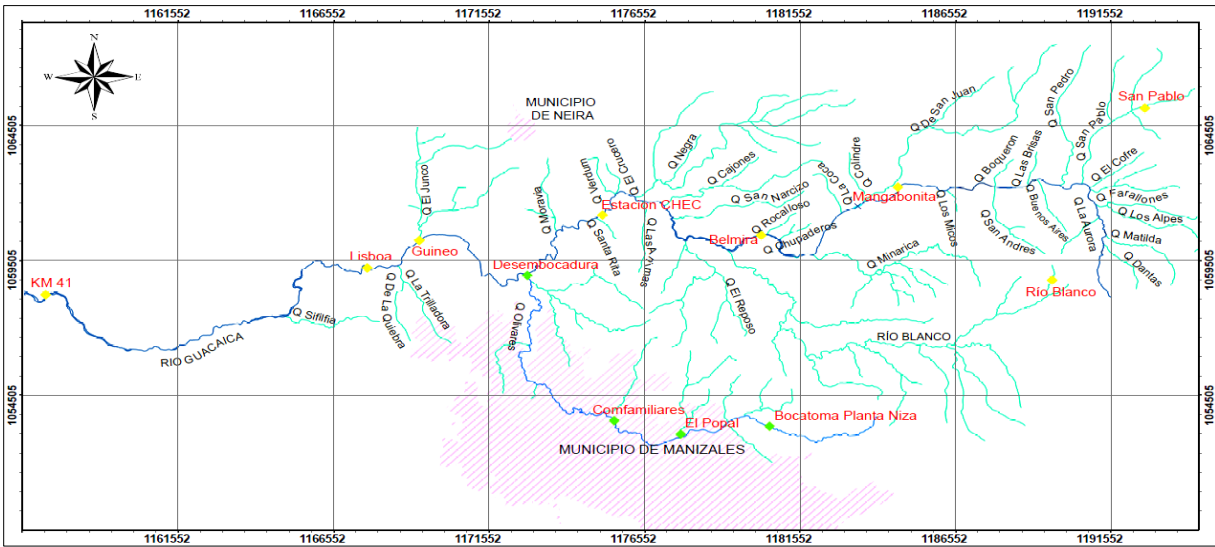
Puntos de Monitoreo		Elevación (m.s.n.m.)	Distancia Acumulada (km)	Coordenadas	
				Longitud	Latitud
Mangabonita	G3	2325	40.87	852229	1060920
Belmira	G4	1938	34.92	847766	1059190
Estación CHEC	G5	1636	26.78	842630	1059990
El Guineo	G6	1237	16.47	836784	1059050
Lisboa	G7	1172	14.18	835099	1058050
Km 41	G8	868	0.35	824764	1057080

Adicionalmente, se seleccionaron 4 puntos de monitoreo sobre la quebrada Olivares con el fin de conocer la influencia y presión que se ejerce sobre este cuerpo de agua, a causa de vertimientos y actividades económicas que afectan la corriente durante su paso por el municipio de Manizales. En la Tabla 5 se detallan los puntos monitoreados.

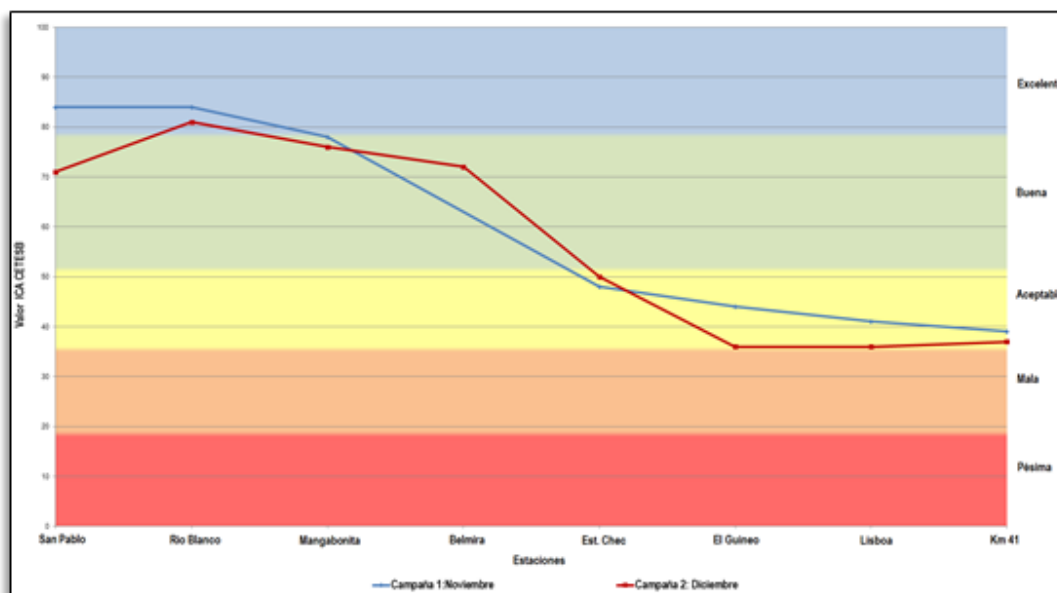
**Tabla 5. Puntos de monitoreo de calidad del agua en la quebrada Olivares. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

Puntos de Monitoreo		Elevación (m.s.n.m.)	Coordenadas	
			Longitud	Latitud
Bocatoma Planta Niza	O1	2293	848006	1052120
El Popal	O2	2200	845191	1051730
Confamiliares	O3	2161	843012	1052350
Desembocadura	O4	1400	840064	1057810

En la Figura 9 se presentan los puntos de monitoreo que fueron seleccionados sobre el río Guacaica y la quebrada Olivares, se observa que el punto de monitoreo San Pablo (G1) y el punto de monitoreo Río Blanco (G2) se encuentran localizados en la parte alta de la subcuenca muy cerca al nacimiento del río Guacaica en la Finca La Esmeralda, los puntos de monitoreo restantes se ubicaron a lo largo de los 52.64 Km que recorre la corriente hasta su desembocadura en el río Chinchiná. En el Anexo 1 se presentan las fichas de campo de los puntos de monitoreo seleccionados sobre el río Guacaica y su principal tributario.



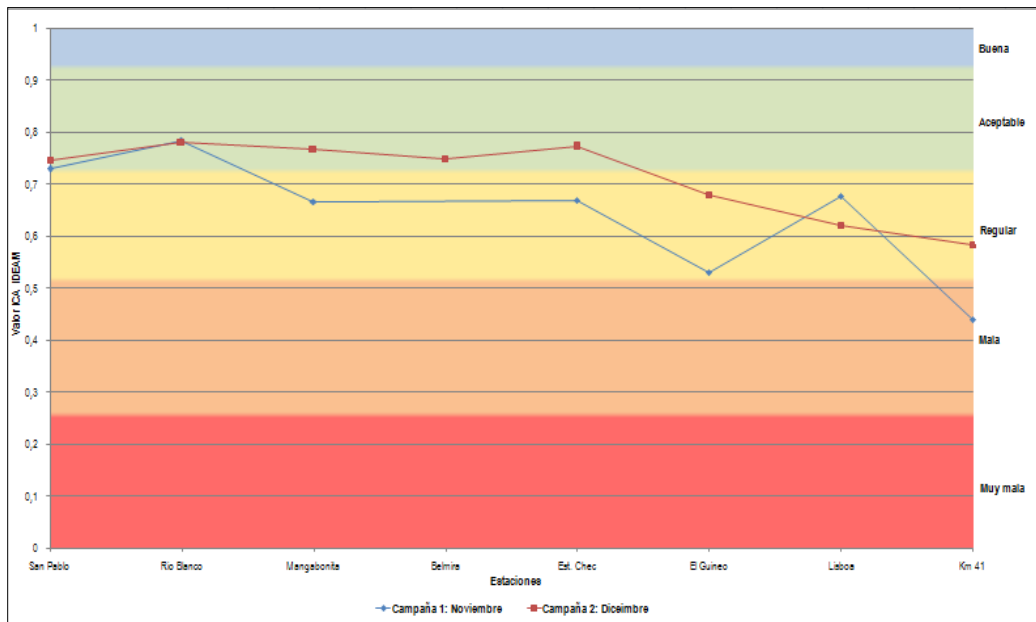




**Figura 10. ICA-CETESB río Guacaica 2012. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

El ICA CETESB para el río Guacaica da cuenta de un agua de buena calidad en aproximadamente la mitad de su recorrido, desde la parte alta en donde se ubica el nacimiento de la corriente y el punto de monitoreo San Pablo, hasta el punto de monitoreo Belmira; de aquí en adelante la calidad se ve deteriorada notablemente y pasa de buena a mala hasta desembocar en el río Chinchiná, el deterioro de la calidad del agua da a entender que a partir de la estación de Belmira, el río está recibiendo vertimientos de diferente origen, por otra parte, recibe también tributarios con una alta carga de aguas residuales domésticas como la quebrada Olivares, que recoge las aguas residuales domésticas de los barrios del norte de la ciudad de Manizales (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013).

El ICA IDEAM es un indicador de calidad del agua similar al ICA CETESB que considera menos variables y su escala de calificación es diferente siendo más desfavorable esta última, puesto que este indicador clasifica la calidad del agua en un rango que varía desde 0 a 1, de manera que el valor más bajo corresponde a una muy mala calidad y el valor más alto hace referencia a un agua de buena calidad; los parámetros de calidad que se agrupan para determinar el índice son: oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno (DQO), conductividad eléctrica y pH. En la Figura 11 se presentan los resultados para el índice de calidad del agua ICA-IDEAM.



**Figura 11. ICA-IDEAM río Guacaica 2012. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

En general, se observa que la tendencia del indicador es similar a la determinada por el ICA CETESB, ya que se observan los mismos puntos críticos y el deterioro progresivo de la calidad del río Guacaica desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Chinchiná.

Los mapas de calidad permiten ubicar y analizar geográficamente las variaciones en la calidad del agua del río y relacionarla con las diferentes actividades sociales y económicas que se presentan a lo largo de este. Así mismo, permite plantear acciones concretas sobre determinadas zonas, con el fin de brindar a la comunidad agua con los requerimientos de calidad necesarios para los diferentes usos. A continuación se presentan los mapas de calidad para el río Guacaica y la quebrada Olivares (Figura 12 y Figura 13), la calidad a lo largo del trayecto de la corriente es marcada con los respectivos colores según la codificación de los índices de calidad (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013).

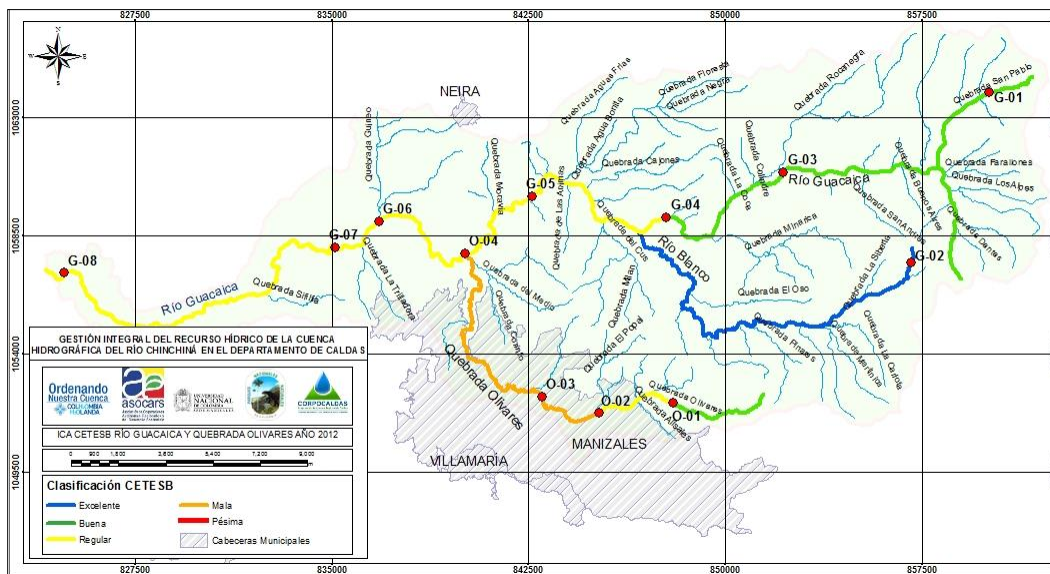


Figura 12. Mapa Calidad ICA-CETESB río Guacaica y quebrada Olivares. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)

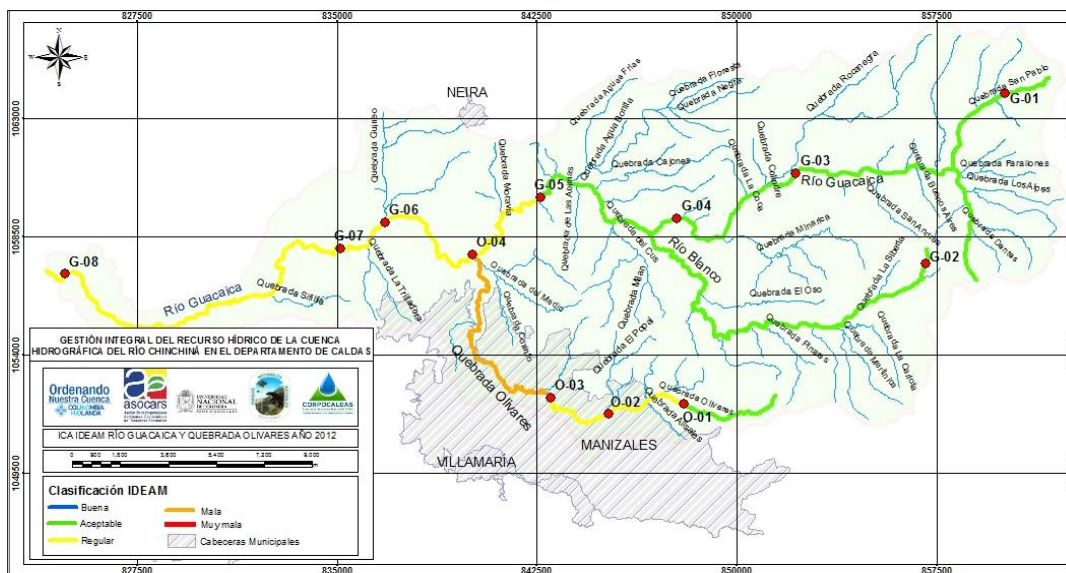


Figura 13. Mapa Calidad ICA-IDEAM río Guacaica y quebrada Olivares (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)

En los mapas anteriores se puede visualizar el recorrido de las corrientes y comprender la correlación que existe entre los colores de los índices de calidad y la presuntas actividades que las afectan, tal como se observa por ejemplo en la quebrada Olivares, en la cual es evidente el deterioro de la calidad del agua cuando ingresa al casco urbano de la ciudad de Manizales y es receptora de vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013).

Para cada estación donde se monitoreó la calidad del agua, se determinó el uso actual con base en las observaciones de los profesionales y técnicos que realizaron tanto las visitas de campo, como los monitoreos en las zonas del río Guacaica, además, con el conocimiento de las actividades productivas, se deduce la posible afectación de la calidad de la fuente hídrica y la intervención del recurso por parte de los diferentes usuarios establecidos sobre la zona, factores que determinan el uso potencial del recurso hídrico (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013).

**Tabla 6. Usos actuales sobre el río Guacaica. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

<b>Punto de Monitoreo</b>	<b>Usos actuales</b>
Estación G1: San Pablo	Consumo humano y doméstico Uso Agrícola Uso Pecuario
Estación G2: Río Blanco	Consumo humano y doméstico Uso Agrícola Uso Pecuario
Estación G3: Mangabonita	Consumo humano y doméstico Uso Agrícola Uso Pecuario
Estación G4: Belmira	Consumo humano y doméstico Uso Agrícola Uso Pecuario
Estación G5: Estación CHEC	Dilución y asimilación de vertimientos de aguas residuales domésticas Dilución y asimilación de vertimientos de beneficio de café Uso Industrial: Generación de energía Uso Industrial: Explotación manual de material de río
Estación G6: El guineo	Dilución y asimilación de vertimientos de beneficio de café Dilución y asimilación de aguas residuales domésticas Uso Industrial: Explotación manual de material de río
Estación G7: Lisboa	Dilución y asimilación de vertimientos de beneficio de café Dilución y asimilación de vertimientos aguas residuales domésticas Uso Industrial: Explotación mecanizada de material de río
Estación G8: Kilómetro 41	Dilución y asimilación de vertimientos de aguas residuales domésticas Dilución y asimilación de vertimientos de beneficio de café

De acuerdo con la Tabla 6. y el análisis de los mapas, se precisa que a partir de la estación G5 (Estación CHEC), el deterioro del agua en este punto hace que esta ya no pueda ser usada para consumo humano, uso pecuario y agrícola, por lo cual, los habitantes de la zona buscan otras fuentes de abastecimiento de agua para dichos usos. Posterior al punto de monitoreo Estación CHEC, la corriente principal es utilizada como receptora de vertimientos de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013).

Por otra parte, con el fin de determinar la oferta del recurso en la subcuenca del río Guacaica, se realizaron los balances hídricos en los tributarios del río y se aforo la corriente principal en los puntos de monitoreo

seleccionados para evaluar la calidad del agua. En la Tabla 7 se presenta la oferta calculada para los tributarios del río Guacaica, la distancia acumulada hace referencia al kilómetro sobre la corriente en cual desemboca cada tributario, teniendo en cuenta que el kilómetro 0 es la desembocadura del río Guacaica en el río Chinchiná.

**Tabla 7. Caudal de tributarios del río Guacaica. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

<b>Microcuenca</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Distancia Acumulada (km)</b>	<b>Caudal(L/s)</b>
Quebrada Dantas	1.026	51.175	45
Quebrada. Matilda	4.829	50.743	210
Quebrada Alpes	4.382	49.377	191
Quebrada Farallones	4.279	48.684	187
Quebrada El Cofre	1.575	48.622	68
Quebrada San Pablo	13.5	48.311	551
Quebrada San Pedro	5.572	47.430	206
Quebrada San Andrés	3.605	45.116	150
Quebrada San Juan	24.318	40.291	886
Quebrada Minarica	16.207	37.583	605
Río Blanco	46.705	33.898	1530
Quebrada Del Cus	9.57	32.268	302
Quebrada San Narciso	3.273	31.151	119
Quebrada Cajones	4.873	30.79	177
Quebrada Las Ánimas	2.015	29.826	66
Quebrada Negra	20.736	29.480	752
Quebrada Del Crucero	1.897	28.689	69
Quebrada Moravia	3.528	28.689	146
Quebrada Olivares	51.478	22.456	1720
Quebrada El Junco	15.442	17.468	663
Quebrada La Trilladora	6.903	16.246	305
Quebrada Sifilia	3.488	10.113	154

De acuerdo a la información anterior, se observa que los tributarios más importantes del río Guacaica desde el punto de vista de su oferta es Río Blanco y la quebrada Olivares, cada uno con caudales mayores a 1 m<sup>3</sup>/s, mientras que los tributarios con menor aporte de caudal es la quebrada Dantas, quebrada El Cofre, quebrada Las Ánimas y quebrada Del Crucero. En la Tabla 8 y la Tabla 9 se presentan los aforos realizados en los puntos de monitoreo seleccionados sobre el río Guacaica, para las dos campañas de monitoreo.

**Tabla 8. Aforo en los puntos de monitoreo del río Guacaica – Campaña Noviembre. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

<b>SITIO MUESTREO</b>	<b>Ancho, W (m)</b>	<b>Área, A (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Velocidad, U (m/s)</b>	<b>Caudal, Q (m<sup>3</sup>/s)</b>
San Pablo	1,80	0,11	0,42	0,043
Río Blanco	1,80	0,07	0,68	0,049
Mangabonita	5,15	2,16	0,63	1,401
Belmira	No se midió	No se midió	No se midió	No se midió
Estación CHEC	18,00	6,41	0,92	5,553
El Guineo	23,00	9,08	1,05	6,099
Lisboa	30,60	7,04	0,74	6,611
Km 41	No se midió	No se midió	No se midió	No se midió

**Tabla 9. Aforo en los puntos de monitoreo del río Guacaica – Campaña Diciembre. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

<b>SITIO MUESTREO</b>	<b>Ancho, W (m)</b>	<b>Área, A (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Velocidad, U (m/s)</b>	<b>Caudal, Q (m<sup>3</sup>/s)</b>
San Pablo	2,60	0,23	0,21	0,03
Río Blanco	2,00	0,11	0,82	0,07
Mangabonita	5,00	1,35	0,30	0,39
Belmira	8,40	3,21	0,31	0,88
Estación CHEC	18,00	6,35	0,38	2,45
El Guineo	23,00	7,05	0,73	4,27
Lisboa	30,60	7,96	0,86	6,65
Km 41	No se midió	No se midió	No se midió	No se midió

### 5.1 Datos de entrada del modelo

Para implementar el modelo de calidad del agua QUAL2Kw en el río Guacaica se partió de la revisión detallada de las hojas de trabajo del QUAL2Kw para identificar los datos de entrada del modelo, se definió la información con la que se contaba y la información que era necesario establecer de acuerdo a la literatura. En la tabla 10 se resumen los datos de entrada del programa y el chequeo realizado.

Tabla 10. Datos de entrada del modelo

Hoja de trabajo del modelo	Descripción	Información existente o asumida de acuerdo a la bibliografía
QUAL2K	Información general de la corriente	Si
Headwater	Caudal y caracterización de la cabecera del río	Si
Reach	Segmentación de la corriente, georreferenciación, y constantes hidráulicas	Si
Air Temperature, Dew Point Temperature, Wind Speed, Cloud Cover, Shade, Solar	Variables meteorológicas	Si
Point Sources	Información de ubicación, caudal y calidad de las fuentes puntuales	Si
Diffuse Sources	Información de ubicación, caudal y calidad de las fuentes difusas	Si
Rates	Valores de los parámetros cinéticos y las velocidades de asentamiento de los diferentes constituyentes simulados por el modelo.	Si
Hydraulic Data, Temperatura Data, WQ Data	Información de ubicación, caudal y calidad medida en los puntos de monitoreo sobre la corriente	Si

## 5.2 Monitoreo de la calidad del agua

La información de cantidad y calidad del agua utilizada para ingresar al modelo fue la recopilada en las dos campañas de campo realizadas en el año 2012 por el IDEA de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que se monitorearon en cada punto de muestreo y a partir de los cuales se alimentó el modelo fueron: conductividad, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, DBO<sub>5</sub> total, DBO<sub>5</sub> filtrada, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico, fósforo inorgánico, patógenos, alcalinidad, temperatura y caudal. En el Anexo 2 se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las dos campañas de monitoreo. En la Tabla 11 se presenta la descripción de los puntos de monitoreo y el aforo de caudal para las dos campañas de monitoreo realizadas en el año 2012, la primera corresponde a tiempo seco y la segunda a tiempo de lluvia.

**Tabla 11. Puntos de monitoreo en el río Guacaica. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

Puntos de Monitoreo		Elevación (m.s.n.m.)	Distancia Acumulada (km)	Campaña Noviembre Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Campaña Diciembre Caudal (m <sup>3</sup> /s)
San Pablo	G1	3730	52,64	0,043	0,03
Río Blanco	G2	3616	44,33	0,049	0,07
Mangabonita	G3	2325	40,87	1,401	0,39
Belmira	G4	1938	34,92	No se midió	0,88
Estación CHEC	G5	1636	26,78	5,55	2,45
El Guineo	G6	1237	16,47	6,090	4,27
Lisboa	G7	1172	14,18	6,611	6,65
Km 41	G8	868	0,35	No se midió	No se midió

Para efectos de la modelación, teniendo en cuenta que al modelo QUAL2Kw se deben ingresar valores de DBO última, se asumió una constante cinética para la DBO ( $K_{DBO}$ ) igual a 0.23 d<sup>-1</sup> de acuerdo a lo reportado en la literatura, puesto que esta variable no fue determinada en el laboratorio (Pelletier et.al., 2004). A partir de los valores de DBO<sub>5</sub> filtrada se calcularon los valores de DBO rápida que deben ingresarse al modelo, en el caso de la DBO lenta, no se contó con la medición del carbono orgánico disuelto, por lo cual se asumió que dadas las características de la corriente la DBO lenta se puede aproximar a cero. Para el caso de los detritus, se asumió que la DBO última de los sólidos suspendidos volátiles (SSV) es igual a los detritus. A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas.



$$DBOu_{Total} = DBOu_{Detritus} + DBOu_{rápida} + DBOu_{lenta} \quad (11)$$

$$DBOu_{Filtrada} = \frac{DBO_{5,filtrada}}{1 - e^{-K \cdot 5}} \quad (12)$$

$$DBOu_{rápida} = DBOu_{filtrada} \quad (13)$$

$$DBOu_{SSV} = g \frac{SSV}{L} * \frac{40g\ C}{g\ SSV} * \frac{2.69gO_2}{gC} \quad (14)$$

$$DBOu_{Detritus} = DBOu_{SSV} \quad (15)$$

$$DBOu_{lenta} \approx 0 \quad (16)$$

Los valores de DBO lenta, DBO rápida y Detritus se calcularon a partir de las ecuaciones anteriores para ser ingresados al modelo, los demás parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que fueron alimentados al modelo no tuvieron ninguna modificación o ajuste y se ingresaron tal cual están descritos en los resultados entregados por el laboratorio.

### 5.3 Identificación de fuentes puntuales y difusas

En el recorrido de 52.64 Km que realiza el río Guacaica desde su nacimiento en la Finca La Esmeralda hasta su desembocadura en el río Chinchiná, se encontró el aporte de caudal de 22 tributarios de acuerdo al estudio realizado por el IDEA de la Universidad Nacional Sede Manizales. Por otra parte, no se determinaron los vertimientos directos sobre la corriente principal y no se encontraron captaciones de agua de los usuarios de la zona directamente sobre el río Guacaica.

En la Tabla 12 se presentan los datos para los tributarios del río Guacaica, la distancia acumulada hace referencia al kilómetro sobre la corriente sobre el cual se ubica cada fuente puntual, teniendo en cuenta que el kilómetro 0 es la desembocadura del río Guacaica en el río Chinchiná.

**Tabla 12. Tributarios del río Guacaica. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

<b>Microcuenca</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Distancia Acumulada (km)</b>	<b>Caudal(L/s)</b>
Quebrada Dantas	1.026	51.175	45
Quebrada. Matilda	4.829	50.743	210
Quebrada Alpes	4.382	49.377	191
Quebrada Farallones	4.279	48.684	187
Quebrada El Cofre	1.575	48.622	68
Quebrada San Pablo	13.5	48.311	551
Quebrada San Pedro	5.572	47.430	206
Quebrada San Andrés	3.605	45.116	150
Quebrada San Juan	24.318	40.291	886
Quebrada Minarica	16.207	37.583	605
Río Blanco	46.705	33.898	1530
Quebrada Del Cus	9.57	32.268	302
Quebrada San Narciso	3.273	31.151	119
Quebrada Cajones	4.873	30.79	177
Quebrada Las Ánimas	2.015	29.826	66
Quebrada Negra	20.736	29.480	752
Quebrada Del Crucero	1.897	28.689	69
Quebrada Moravia	3.528	28.689	146
Quebrada Olivares	51.478	22.456	1720
Quebrada El Junco	15.442	17.468	663
Quebrada La Trilladora	6.903	16.246	305
Quebrada Sifilia	3.488	10.113	154

Para el ingreso al modelo de la caracterización físicoquímica de los tributarios, se asumió la caracterización físicoquímica de la estación de monitoreo sobre el río Guacaica más cercana a su desembocadura en el mismo, esto teniendo en cuenta que no se contó con información de campo para los tributarios. El aporte de fuentes difusas se determinó a partir del balance de caudal entre los puntos de monitoreo sobre la corriente.

## 5.4 Definición de constantes hidráulicas

Las constantes hidráulicas se ingresaron al modelo de calidad QUAL2Kw por el método de Manning, esto teniendo en cuenta que en el estudio realizado por el IDEA de la Universidad Nacional Sede Manizales, se encontraba la información necesaria para determinar los valores por tramos que exige el método. Los valores de las constantes hidráulicas que se determinaron para el río Guacaica se presentan a continuación en la Tabla 13.

**Tabla 13. Definición de constantes hidráulicas. (Corpocaldas - IDEA U.N., 2013)**

Tramo	Pendiente	Coefficiente de Manning	Ancho, m
Cabecera - Mangabonita	0.112	0.08	4.00
Mangabonita - Belmira	0.051	0.08	5.15
Belmira - Est. Chec	0.037	0.08	5.15
Est. Chec - El Guineo	0.037	0.08	18.00
El Guineo - Lisboa	0.040	0.08	23.00
Lisboa - km 41	0.025	0.08	30.60
km 41 - Desembocadura	0.017	0.08	30.60

## 5.5 Definición de constantes cinéticas a calibrar

El artículo 7 del Decreto 3930 del 2010 establece los siguientes parámetros mínimos a tener en cuenta para implementar los modelos de simulación de la calidad del agua con fines de ordenamiento del recurso hídrico: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos, pH, temperatura, oxígeno disuelto, caudal, coliformes totales y coliformes fecales.

Teniendo en cuenta los parámetros que permite modelar el QUAL2Kw y las constantes cinéticas involucradas, así como lo que establece la norma vigente para los modelos implementados con fines de ordenamiento, se definió calibrar las constantes cinéticas de la Tabla 14.

**Tabla 14. Constantes cinéticas para calibración**

Constante cinética	Abreviación	Unidades
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos inorgánico	VS - SSI	m/d
Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO slow	1/d
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa oxidación DBO- DBO slow	1/d
Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	T. Oxidación DBO fast	1/d
Hidrólisis de nitrógeno orgánico	Hidrólisis NO	1/d
Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico	VS-NO	m/d
Tasa de nitrificación de amonio	Tasa Nitrificación	1/d
Tasa de desnitrificación de nitratos (importante cuando existen condiciones anaeróbicas)	Tasa Desnitrificación	1/d
Coefficiente de transferencia por desnitrificación de sedimentos	CT- Desnitrificación Sed.	m/d
Hidrólisis del Fósforo Orgánico	Hidrólisis PO	m/d
Velocidad de sedimentación del Fósforo Orgánico	VS - PO	1/d
Velocidad de sedimentación del Fósforo Inorgánico	VS - PI	m/d
Hidrólisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Hidrólisis POM	m/d

Constante cinética	Abreviación	Unidades
Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Vel. Sedimentación POM	1/d

Los valores iniciales de las constantes cinéticas son los que trae el ejemplo del programa al descargarse, se revisó que los valores estuvieran en los rangos establecidos en la literatura (Tabla 3) y a partir de estos valores se inició la calibración automática del modelo.

## 5.6 Definición de variables meteorológicas

Se determinaron las variables meteorológicas para los días en los que se realizó el monitoreo, esta información se obtuvo a partir de la información recopilada en campo y la información de la Red de Monitoreo Meteorológica de Caldas disponible en la web. En la Tabla 15 se presentan los datos para los meses en los cuales se realizaron los monitoreos de calidad del agua y que fueron utilizados para alimentar el modelo QUAL2Kw.

**Tabla 15. Variables meteorológicas, datos medios mensuales**

Variable	Noviembre - Campaña 1	Diciembre – Campaña 2
Precipitación (mm )	195	313
Temperatura del aire (°C)	15.27	14.73
Brillo solar (h)	4.46	3.40
Humedad relativa (%)	80	83
Velocidad del viento (m/s)	1.8 – 2.2	1.8 – 2.2

Los valores de temperatura de rocío se determinaron a partir de la temperatura del aire y la humedad relativa. En el caso de la sombra y la nubosidad, estos datos se ingresaron de acuerdo a las observaciones realizadas en campo en cada punto de monitoreo.

## 5.7 Calibración y confirmación

Se utilizaron los datos de calidad del agua y la información correspondiente a la campaña de monitoreo de noviembre para realizar la calibración del modelo, esto teniendo en cuenta que esta campaña correspondió a tiempo seco. Por otra parte, la información de campo recopilada en la campaña de monitoreo de diciembre (tiempo de lluvia) se utilizó para la confirmación de las constantes cinéticas encontradas en la calibración del modelo.

Antes de iniciar la calibración del modelo de calidad, se definió el modelo de reaeración que más se ajustaba a las características de la corriente, para esto, se ensayaron todos los modelos que se describieron en la Tabla 2, hasta encontrar que el modelo USGS (pool-riffle) es el que mejor se ajustaba.

Teniendo en cuenta que el QUAL2Kw realiza la calibración automática de las constantes cinéticas mediante algoritmos genéticos para obtener un margen de error mínimo entre los datos medidos en campo y los datos simulados por el modelo, se seleccionó la función objetivo recomendada por Kannel et. al y Pelletier et al. que se presenta a continuación.

$$f(x) = \left[ \sum_{i=1}^q w_i \right] \left[ \sum_{i=1}^q \frac{1}{w_i} \left[ \frac{\frac{\sum_{j=1}^m O_{i,j}}{m}}{\left[ \frac{\sum_{j=1}^m (P_{i,j} - O_{i,j})^2}{m} \right]^{1/2}} \right] \right] \quad (17)$$

Donde:  $O_{i,j}$  es el valor observado,  $P_{i,j}$  es el valor predicho por el modelo,  $m$  es el número de pares de valores observados y predichos,  $w_i$  es el factor de peso y  $q$  es el número de variables de estado.

El peso asignado a cada variable se definió de acuerdo a la importancia del parámetro en la modelación y a la confiabilidad del dato, por esta razón variables como conductividad, oxígeno disuelto, pH y sólidos suspendidos totales, tuvieron pesos más altos que las otras variables fisicoquímicas.

La función objetivo se programó en la hoja de trabajo "Fitness" del programa y se enlazó al algoritmo genético y las constantes cinéticas a calibrar en la hoja de trabajo "Rates". En el algoritmo genético los valores de velocidad de mutación inicial, velocidad de mutación mínima y máxima, y el número de dígitos para codificar el genotipo correspondieron a los valores que trae el ejemplo del programa. El número de poblaciones y de generaciones se fue incrementando y para cada combinación se calibró el modelo, al final se seleccionó una población de 10 y un número de generaciones de 50 para la calibración definitiva, puesto que representaba el mejor ajuste en un menor tiempo de cálculo. En la tabla Tabla 16. se resumen los datos del AG utilizado para la calibración.

**Tabla 16. Algoritmo genético para calibración**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Random number seed	123456	seed
Model runs in a population ( $\leq 512$ )	10	np
Generations in the evolution	50	ngen
Digits to encode genotype ( $\leq 6$ )	5	nd
Crossover mode (1, 2, 3, 4, 5, 6, or 7)	3	icross
Crossover probability (0-1):	0.85	pcross
Mutation mode (1, 2, 3, 4, 5, or 6)	2	imut
Initial mutation rate (0-1):	0.005	pmut
Minimum mutation rate (0-1):	0.0005	pmutmn
Maximum mutation rate (0-1):	0.25	pmutmx
Relative fitness differential (0-1):	1	fdif
Reproduction plan (1, 2, or 3):	1	irep
Elitism (0 or 1):	1	ielite
Restart from previous evolution (0 or 1):	0	irestart

Una vez se ingresó al modelo toda la información de la campaña de monitoreo seleccionada para la calibración, se definió el modelo de reaireación, se programó la función objetivo, se seleccionaron las constantes cinéticas a calibrar y se definieron los parámetros del algoritmo genético, se ejecutó la opción “Run Auto-cal” del modelo. Al finalizar la calibración se obtuvieron las gráficas con los resultados para los parámetros modelados. Para evaluar los resultados de la calibración se determinaron los porcentajes de error entre los datos simulados por el modelo y los datos de campo en las estaciones de monitoreo.

Finalizado el proceso de calibración, se alimentó el modelo con los datos de la campaña de monitoreo seleccionada para la confirmación, se mantuvieron fijas las constantes cinéticas calibradas y se ejecutó la opción “RUN Fortran” del modelo para correr el programa con los nuevos datos ingresados. Al finalizar la corrida se obtuvieron las gráficas con los resultados para los parámetros modelados. Para evaluar los resultados de la confirmación se determinaron los porcentajes de error entre los datos simulados por el modelo y los datos de campo en las estaciones de monitoreo.

## 5.8 Planteamiento del escenario de saneamiento

Una de las mayores utilidades de los modelos matemáticos de simulación está determinada por su capacidad predictiva, siendo esta la capacidad del modelo de describir otras series de tiempo sin que se requiera el ajuste de alguno de los parámetros calibrados. Por este motivo, una vez calibrado y confirmado el modelo de calidad

QUAL2Kw, se cuenta con una herramienta capaz de predecir la respuesta de la corriente ante distintos escenarios de intervención.

Con el objetivo de comparar el nivel de asimilación y/o depuración de dos de los parámetros más representativos de la calidad del agua ( $\text{DBO}_5$  y sólidos suspendidos totales) en el río Guacaica ante un escenario futuro, se formuló un escenario de saneamiento y se definió la información correspondiente para ser ingresada al modelo de calidad.

El escenario de saneamiento futuro que se proyectó para el río Guacaica consistió en evaluar el impacto que tendrá sobre la corriente la construcción y la operación de los colectores de aguas residuales domésticas en el distrito norte de la ciudad de Manizales, los cuales llevarán las aguas residuales a la futura Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Manizales. Estas descargas se realizan actualmente sobre la quebrada Olivares, la cual posteriormente desemboca en el río Guacaica disminuyendo su calidad.

La quebrada Olivares justo antes de su desembocadura en el río Guacaica evidencia una alta presencia de espuma y olores muy fuertes, además los resultados del laboratorio obtenidos a partir de las campañas de monitoreo que realizó el IDEA de la Universidad Nacional Sede Manizales en el año 2012, dan cuenta de una  $\text{DBO}_5$  de 68 mg/L y una concentración de sólidos suspendidos totales de 112 mg/L, lo cual demuestra el estado de fuerte contaminación en el que se encuentra la quebrada.

Se definió que al eliminar los vertimientos directos de aguas residuales domésticas sobre la quebrada Olivares, se espera que se disminuya en al menos el 80% la concentración de los contaminantes en la corriente en su desembocadura en el río Guaciaca como se presenta en la Tabla 17.

**Tabla 17. Formulación del escenario de saneamiento**

<b>Variable</b>	<b>Valor actual en desembocadura de la quebrada Olivares</b>	<b>Valor futuro esperado en desembocadura de la quebrada Olivares</b>
$\text{DBO}_5$ (mg/L)	68	13,6
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	112	22,4

Se alimentó el modelo con los datos del escenario en la hoja de trabajo “Point Sources”, puesto que la quebrada Olivares es un tributario del río Guacaica, la información restante de la corriente y las constantes cinéticas

calibradas se mantuvo fija, posteriormente se ejecutó la opción “Run Fortran” del modelo para correr el programa con los nuevos datos ingresados. El escenario se evaluó tanto para tiempo seco como para tiempo de lluvia, al finalizar las corridas se obtuvieron las gráficas con los resultados para los parámetros modelados



## 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 6.1 Alimentación del modelo

Se realizó la alimentación del modelo de calidad del agua QUAL2Kw tal y como se describió en la metodología, la información general ingresada en cada hoja de trabajo del programa se puede resumir de la siguiente forma: parámetros fisicoquímicos y microbiológicos tomados en campo en las campañas de monitoreo, descripción de los tramos del río, constantes hidráulicas, selección de las constantes cinéticas de calibración, condiciones meteorológicas (temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y sombra), y la información fisicoquímica correspondiente a fuentes puntuales y difusas.

En la Figura 14 se presenta la hoja de trabajo inicial del QUAL2Kw, en la cual se ingresó entre otras cosas el nombre de la corriente, la fecha, la zona horaria en la cual se ubica la corriente, y se especificaron algunas opciones para la ejecución del modelo

1	<b>QUAL2Kw (version 5.1)</b>		
2	<b>Stream Water Quality Model</b>		
3	<b>Greg Pelletier, Steve Chapra, and Hua Tao</b>		
4	<b>Department of Ecology and Tufts University</b>		
5			
6			
7	<b>System ID:</b>		
8	River name	Río Guacaica	
9	Saved file name	Calibracion	
10	Directory where the input/output files are saved		
11	Month	11	
12	Day	21	
13	Year	2012	
14	Local standard time zone relative to UTC	-5 hours	
15	Daylight savings time	No	
16	<b>Simulation and output options:</b>		
17	Calculation step	1,40625 minutes	
18	Number of days	2 days	
19	Solution method (integration)	Euler	
20	Solution method (pH)	Newton-Raphson	
21	Simulate hyporheic exchange and pore water quality	Level 2	
22	Display dynamic diel output	No	
23	State variables for simulation	All	
<div><span>QUAL2K</span> <span>Headwater</span> <span>Reach</span> <span>Reach Rates</span> <span>Initial Conditions</span> <span>Air Temperature</span> <span>Dew Point Temperature</span> <span>Wind Speed</span></div>			
LISTO			

Figura 14. Hoja de trabajo inicial del QUAL2Kw

En la Figura 15 se presenta la hoja de trabajo Headwater, en la cual se ingresó el caudal y la información fisicoquímica de la cabecera de la corriente.

1	<b>QUAL2Kw</b>									
2	<b>Stream Water Quality Model</b>									
3	<b>Rio Guacaica (11/21/2012)</b>									
4	<b>Headwater and Downstream Boundary Data:</b>									
5										
6										
7	Headwater Flow	0,046	m3/s							
8	Prescribed downstream boundary?	No								
9	Headwater Water Quality	Units	12:00 a. m.	1:00 a. m.	2:00 a. m.	3:00 a. m.	4:00 a. m.	5:00 a. m.		
10	Temperature	C	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10		
11	Conductivity	umhos	47,90	47,90	47,90	47,90	47,90	47,90		
12	Inorganic Solids	mgD/L	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00		
13	Dissolved Oxygen	mg/L	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00		
14	CBODslow	mgO2/L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
15	CBODfast	mgO2/L	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90		
16	Organic Nitrogen	ugN/L	1315,00	1315,00	1315,00	1315,00	1315,00	1315,00		
17	NH4-Nitrogen	ugN/L	225,00	225,00	225,00	225,00	225,00	225,00		
18	NO3-Nitrogen	ugN/L	885	885	885	885	885	885		
19	Organic Phosphorus	ugP/L	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00		
20	Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00		
21	Phytoplankton	ugA/L								
22	Detritus (POM)	mgD/L	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75		
23	Pathogen	cfu/100 mL	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00		
24										
	QUAL2K	Headwater	Reach	Reach Rates	Initial Conditions	Air Temperature	Dew Point Temperature	Wind Speed		

Figura 15. Hoja de trabajo Headwater

En la Figura 16 se presenta la hoja de trabajo "Reach", en la cual se ingresaron las constantes hidráulicas de la corriente y la información de cada uno de los tramos en los que se segmentó el río.

1												
2												
3												
4												
5												
6	<b>Hydraulic Model (Weir Overrides Rating Curves; Rating Curves Override Manning Formula)</b>											
7	<b>Weir</b>		<b>Rating Curves</b>				<b>Manning Formula</b>					<b>Presc</b>
8	<b>Height</b>	<b>Width</b>	<b>Velocity</b>		<b>Depth</b>		<b>Channel</b>	<b>Manning</b>	<b>Bot Width</b>	<b>Side</b>	<b>Side</b>	<b>Dispe</b>
9	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	<b>Coefficient</b>	<b>Exponent</b>	<b>Coefficient</b>	<b>Exponent</b>	<b>Slope</b>	<b>n</b>	<b>m</b>	<b>Slope</b>	<b>Slope</b>	<b>m</b>
12	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
13	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
14	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
15	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
16	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
17	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
18	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
19	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
20	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
21	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
22	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
23	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
24	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
25	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,112	0,0800	4,00	0,00	0,00	
	QUAL2K	Headwater	Reach	Reach Rates	Initial Conditions	Air Temperature	Dew Point Temperature	Wind Speed	Cloud Co			

Figura 16. Hoja de trabajo Reach

[illegible]

En la Figura 18 se presenta la hoja de trabajo “Point Sources”, en la cual se ingresó el caudal y la información fisicoquímica correspondiente a fuentes puntuales.

**Figura 18. Hoja de trabajo Point sources**

En la Figura 19 se presenta la hoja de trabajo “Rates”, en la cual se definieron las constantes cinéticas a calibrar y sus valores iniciales, también se definió en esta hoja de trabajo los parámetros del algoritmo genético.

1	<b>QUAL2Kw</b>					
2	<b>Stream Water Quality Model</b>					
3	<b>Rio Guacaica (11/21/2012)</b>					
4	<b>Global rate parameters</b>					
5						
6						
7	<b>Parameter</b>	<b>Value</b>	<b>Units</b>	<b>Symbol</b>	<b>Auto-calibration inputs</b>	
8	<b>Stoichiometry:</b>				<b>Auto-cal</b>	<b>Min value</b>
9	Carbon	40	gC	gC	No	30
10	Nitrogen	7,2	gN	gN	No	3
11	Phosphorus	1	gP	gP	No	0,4
12	Dry weight	100	gD	gD	No	100
13	Chlorophyll	1	gA	gA	No	0,4
14	<b>Inorganic suspended solids:</b>					
15	Settling velocity	0,00272	m/d	$v_i$	Yes	0
16	<b>Oxygen:</b>					
17	Reaeration model	USGS(pool-riffle)			No	
18	Temp correction	1,024		$\theta_a$		
19	Reaeration wind effect	None				
20	O2 for carbon oxidation	2,69	gO <sub>2</sub> /gC	$r_{oc}$		
21	O2 for NH4 nitrification	4,57	gO <sub>2</sub> /gN	$r_{on}$		
22	Oxygen for nitrification					
23						

Cloud Cover   Shade   Solar   Light and Heat   Point Sources   Diffuse Sources   Rates   Fitness   Auto-calibration   warnings   Hy

Figura 19. Hoja de trabajo Rates

En la Figura 20 se presenta la hoja de trabajo “WQ Data”, en la cual se ingresó la información de calidad del agua de los puntos de monitoreo sobre la corriente.

1	<b>QUAL2Kw</b>								
2	<b>Stream Water Quality Model</b>								
3	<b>Rio Guacaica (11/21/2012)</b>								
4	<b>Water Quality Data:</b>								
5									
6									
7	<b>Distance</b>	<b>Cond (umhos)</b>	<b>ISS (mgD/L)</b>	<b>DO (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>CBODs (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>CBODf (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>Norg (ugN/L)</b>	<b>NH4 (ugN/L)</b>	<b>NO3 (ugN/L)</b>
8	<b>km</b>	<b>data</b>	<b>data</b>	<b>data</b>	<b>data</b>	<b>data</b>	<b>data</b>	<b>data</b>	<b>data</b>
9	52,64	47,90	6,00	7,00			1315,00	225	885,00
10	40,870	63,70	18,00	7,30			120,00	100	1170,00
11	26,780	99,30	53,00	7,92			810,00	400	720,00
12	16,470	149,20	46,50	7,71			1060,00	2140	710,00
13	14,180	168,90	79,00	7,60			1170,00	1330	40,00
14	0,350	168,60	130,50	7,50			950,00	1000	1110,00
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									

Shade   Solar   Light and Heat   Point Sources   Diffuse Sources   Rates   Fitness   Auto-calibration   warnings   Hydraulics Dat

Figura 20. Hoja de trabajo WQ Data

## 6.2 Calibración y confirmación del modelo

A continuación se presentan los resultados de la calibración y confirmación del modelo, teniendo en cuenta que la calibración se realizó a partir de la información de la campaña de monitoreo realizada en tiempo seco (noviembre), y se corrió el modelo en modo “Auto-cal” para encontrar las constantes cinéticas de la corriente. Por otra parte, la confirmación se realizó a partir de la información de la campaña de monitoreo realizada en tiempo de lluvia (diciembre) y se mantuvieron fijas las constantes cinéticas calibradas.

La calibración del modelo de calidad de agua mediante el algoritmo genético (AG) y la función objetivo recomendada por Kannel et. al y Pelletier et al., permitió determinar las constantes cinéticas que se adaptan mejor para el río Guacaica. En la Tabla 18 se presenta las constantes cinéticas calibradas para la corriente, se observa que los valores encontrados por el modelo se encuentran en los rangos establecidos en la literatura.

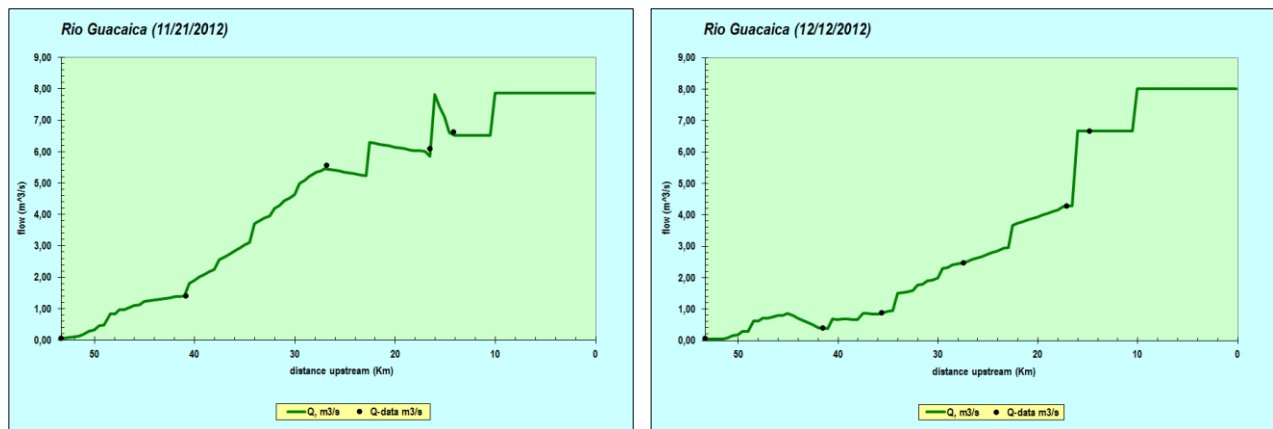
**Tabla 18. Constantes calibradas para el río Guacaica**

<b>Constante cinética</b>	<b>Abreviación</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>	<b>Rango</b>
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos inorgánico	VS - SSI	m/d	0.00272	0 – 2
Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO slow	1/d	0.36165	0 – 5
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa oxidación DBO- DBO slow	1/d	0.019925	0 – 0.5
Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	T. Oxidación DBO fast	1/d	0.36525	0 – 5
Hidrólisis de nitrógeno orgánico	Hidrólisis NO	1/d	3.52015	0 – 5
Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico	VS-NO	m/d	0.99286	0 – 2
Tasa de nitrificación de amonio	Tasa Nitrificación	1/d	6.4553	0 – 10
Tasa de desnitrificación de nitratos (importante cuando existen condiciones anaeróbicas)	Tasa Desnitrificación	1/d	0.2557	0 – 2
Coefficiente de transferencia por desnitrificación de sedimentos	CT- Desnitrificación Sed.	m/d	0.61166	0 – 1
Hidrólisis del Fósforo Orgánico	Hidrólisis PO	m/d	0.63035	0 – 5
Velocidad de sedimentación del Fósforo Orgánico	VS - PO	1/d	1.0796	0 – 2
Velocidad de sedimentación del Fósforo Inorgánico	VS - PI	m/d	0.04028	0 – 2
Hidrólisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Hidrólisis POM	m/d	1.007	0 - 5
Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Vel. Sedimentación POM	1/d	4.013	0 - 5

En forma general los resultados de la calibración y confirmación del modelo de simulación muestran un ajuste moderado entre los valores calculados por el modelo y los valores medidos en campo de las diferentes variables, esto teniendo en cuenta que se trata de la primera modelación que se realiza sobre el río Guacaica y los resultados aquí encontrados establecen una línea base para futuras modelaciones que permitan ajustar las constantes calibradas. Se resalta que la confirmación del modelo QUAL2Kw se realizó con una campaña de monitoreo que presentó condiciones hidrológicas y ambientales diferentes (tiempo lluvia) a las observadas en la calibración (tiempo de seco).

En las Figuras 21, 22, 23, 24 y 25 se presentan los resultados del modelo para el caudal, la temperatura, el oxígeno disuelto, la DBO rápida y los sólidos suspendidos totales respectivamente, en las figuras la línea continua representa la predicción que realiza el modelo, mientras que los puntos representan los datos medidos en campo a lo largo de la corriente en cada campaña de monitoreo. Los resultados para los otros parámetros de calidad del agua se pueden observar en el Anexo 3.

El caudal es determinado por el software mediante los balances de flujo, partiendo del caudal de cabecera del río y los aportes por fuentes puntuales y fuentes difusas a lo largo de su recorrido. Es importante tener en cuenta que al modelo solo se ingresó la información de caudal para los tributarios y fuentes difusas del río Guacaica, puesto que no se contaba con la información de vertimientos y captaciones en la corriente. Los resultados para la calibración y la confirmación del caudal se presentan en la Figura 21.



**Figura 21. Calibración y confirmación del caudal**

Se tiene entonces que el caudal de río Guacacia aumenta progresivamente a lo largo de su recorrido, en la cabecera presenta un caudal de 0.05 m³/s (kilómetro 52.64) y desemboca en el río Chinchiná con un caudal aproximado de 8 m³/s

(kilómetro 0). El caudal a lo largo de la corriente se ajustó tanto en la calibración como en la confirmación mediante el ingreso de fuentes difusas, las cuales fueron determinadas por medio de balances de flujo entre los puntos de monitoreo.

La temperatura del agua tiene una gran importancia en el desarrollo de los diversos procesos que en ella se realizan, de forma que un aumento de la temperatura modifica la solubilidad de las sustancias, aumentando la de los sólidos disueltos y disminuyendo la de los gases (Jiménez, 2000). Los resultados para la calibración y la confirmación de la temperatura se presentan en la Figura 22.

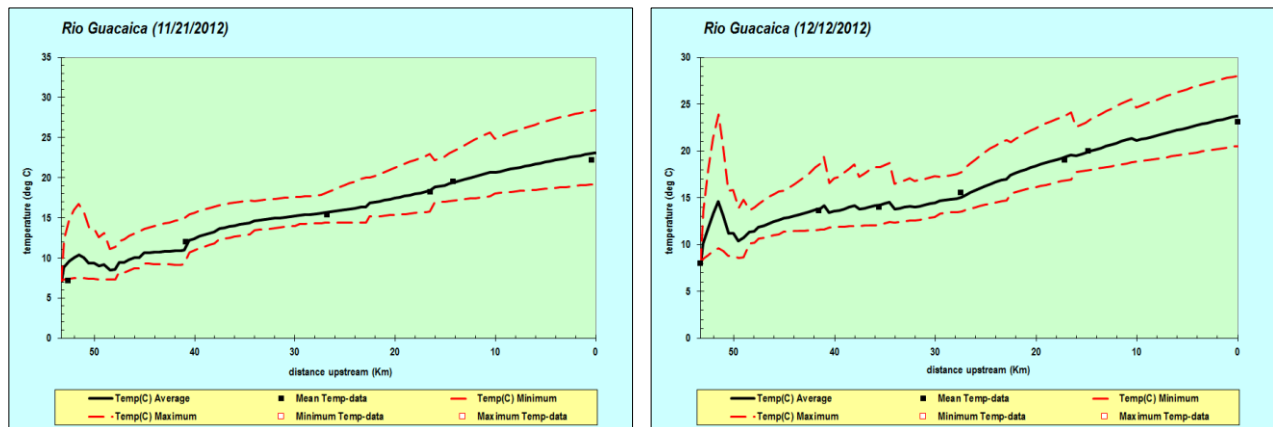


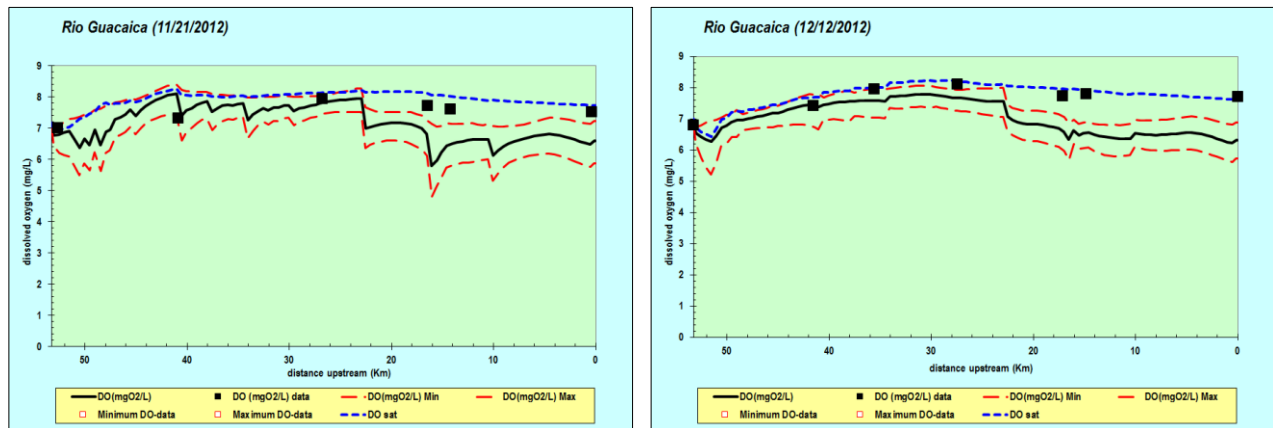
Figura 22. Calibración y confirmación de la temperatura

De acuerdo a los datos de temperatura medidos durante las campañas de monitoreo, se observa que la temperatura para el río Guacaica en la parte alta donde se ubica el punto de monitoreo de San Pablo (nacimiento del río) es de 8°C aproximadamente. Posteriormente conforme el río avanza en su recorrido, la temperatura va aumentando progresivamente debido a la transferencia de calor de los elementos adyacentes, de la transferencia de calor entre los sedimentos, el agua y la atmósfera, y de las entradas y salidas externas al sistema (Chapra et.al., 2008). De esta forma, el río Guacaica desemboca en el río Chinchiná con una temperatura de 23°C aproximadamente. Los valores de temperatura de la corriente se consideran normales para corrientes ubicadas en esta zona.

En cuanto a los resultados de la calibración y confirmación del modelo para la temperatura, puede observarse que en ambos casos el modelo se ajusta a lo largo de la corriente, puesto que los resultados del modelo representan adecuadamente los valores de temperatura determinados en campo.

Todos los organismos dependen de una u otra forma del oxígeno para mantener los procesos metabólicos que producen energía para su crecimiento y reproducción. El agotamiento de este elemento por la oxidación de materia orgánica e inorgánica o la disminución de su solubilidad en el agua por la presencia de sales, son factores que afectan considerablemente la presencia de la vida acuática (Vera, 2007). De acuerdo a los estándares de calidad del agua, se sabe que una concentración de oxígeno disuelto menor a 5 mg/L afecta la diversidad biológica.

En la Figura 23 se presentan los resultados para la calibración y la confirmación del oxígeno disuelto en el río Guacaica, en este caso, la línea azul representa el máximo oxígeno disuelto que se puede alcanzar a lo largo de la corriente (oxígeno disuelto de saturación), la línea continua representa los resultados de la simulación y los puntos los datos medidos en campo.



**Figura 23. Calibración y confirmación del oxígeno disuelto**

En este caso se encontró que el río Guacaica en todo su recorrido presenta altas concentraciones de oxígeno disuelto muy cercanas al oxígeno de saturación, esta característica es común en ríos de montaña con una gran capacidad de autodepuración, debido a las altas tasas de reaeración ocasionadas por la gran turbulencia del flujo.

En la modelación del oxígeno disuelto, este componente se incrementa debido al proceso de fotosíntesis de las plantas, la biomasa de las algas de fondo y el fitoplancton. Así mismo, la concentración del oxígeno decrece debido al proceso de oxidación de la DBO rápida, por la respiración de las plantas y por los procesos de nitrificación. La reaeración debido a las condiciones hidráulicas del sistema que se está modelando, puede



aportar o consumir oxígeno dependiendo si el oxígeno presente es inferior o superior al oxígeno de saturación respectivamente (Chapra et al, 2006).

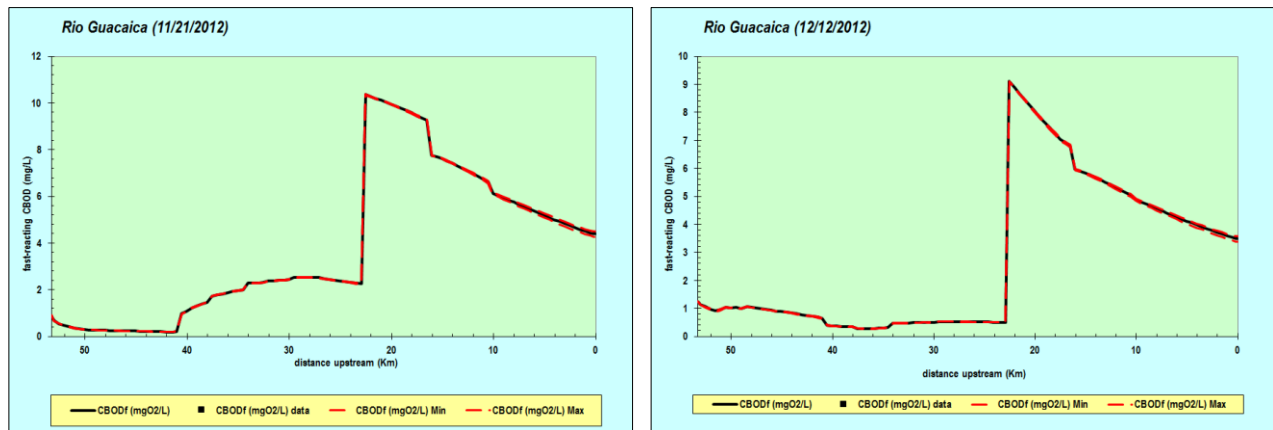
Los resultados de la calibración y confirmación del modelo para el oxígeno disuelto, permiten observar que en ambos casos el modelo reproduce en buena medida los datos de campo en la zona alta y la zona media de la corriente, mientras que en la parte baja (kilómetro 20 antes de la desembocadura) los resultados del modelo se distancian de los datos medidos en campo. Este resultado puede estar ocasionado por la presencia de cascadas en el tramo que incrementan la reaeración de la corriente y no se incluyeron en el modelo. En la Tabla 19 se presenta el cálculo de los porcentajes de error entre los datos medidos en campo y los resultados del modelo para la calibración y la confirmación de este parámetro de calidad del agua en el río Guacaica.

**Tabla 19. Porcentaje de error en calibración y confirmación del oxígeno disuelto**

Puntos de Monitoreo	% Error calibración	% Error confirmación
San Pablo	0.00 %	0.00 %
Mangabonita	10.46 %	0.16 %
Belmira	No se midió	4.59 5
Estación CHEC	2.33 5	5.23 %
El Guíneo	8.54 %	13.43 5
Lisboa	15.27 %	15.83 5
Km 41	12.20 %	17.90 %

En general puede observarse que para el caso del oxígeno disuelto, los porcentajes de error de los parámetros medidos en campo y los simulados por el QUAL2Kw son moderados tanto en la calibración como en la confirmación del modelo (ninguno excede el 18%), siendo evidente que en los kilómetros finales es donde el modelo no se ajustó correctamente y por consiguiente el error es mayor.

La demanda bioquímica de oxígeno se define de forma general como la cantidad de oxígeno requerida por las bacterias en el proceso de estabilización de la materia orgánica descomponible bajo condiciones aeróbicas (Vera, 2007). Por otra parte, la DBO rápida representa la materia orgánica que es rápidamente biodegradable, aumenta debido a la disolución de detrito, y se pierde por hidrólisis y oxidación. En la Figura 24, se presentan los resultados para la calibración y la confirmación de este parámetro de calidad del agua en el río Guacaica.



**Figura 24. Calibración y confirmación de la DBO rápida**

A partir de los datos medidos en campo se observa que la DBO rápida en el río Guacaica presenta valores superiores a 5 mg/L a partir del kilómetro 22 aproximadamente antes de su desembocadura en el río Chinchiná, por lo cual es evidente el deterioro de la calidad del agua en el río Guacaica cuando la quebrada Olivares descarga sus aguas en el kilómetro 22.45, ocasionando que la concentración de la DBO rápida se incremente a valores cercanos a 10 mg/L. Lo anterior corresponde de acuerdo a los estándares de calidad del agua a una corriente en mal estado, ya que se considera que DBO mayores a 5 mg/L son corrientes contaminadas.

La DBO es el parámetro que más dificultades presenta para ser simulado, posiblemente por tratarse de un bioensayo donde son muchos los factores que afectan la medición, como por ejemplo la relación de la materia orgánica soluble a la suspendida, los sólidos sedimentables y los flotables, la presencia de hierro en su forma oxidada o reducida, la presencia de compuestos azufrados entre otros (Corporación Autónoma Regional del Cauca CAR, 2012).

En el caso de la DBO rápida no se ingresaron valores medidos en campo como puede observarse, ya que este parámetro no fue determinado en el laboratorio y para su cálculo se asumió un valor de la constante cinética de degradación y se calculó a partir de la DBO filtrada.

Los sólidos disueltos pueden afectar adversamente la calidad de un cuerpo de agua, el promedio de sólidos disueltos totales para los ríos de todo el mundo ha sido estimado en alrededor de 120 ppm (Livingston, 1963). En la Figura 25, se presentan los resultados para la calibración y la confirmación de los sólidos suspendidos totales en el río Guacaica desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Chinchiná.

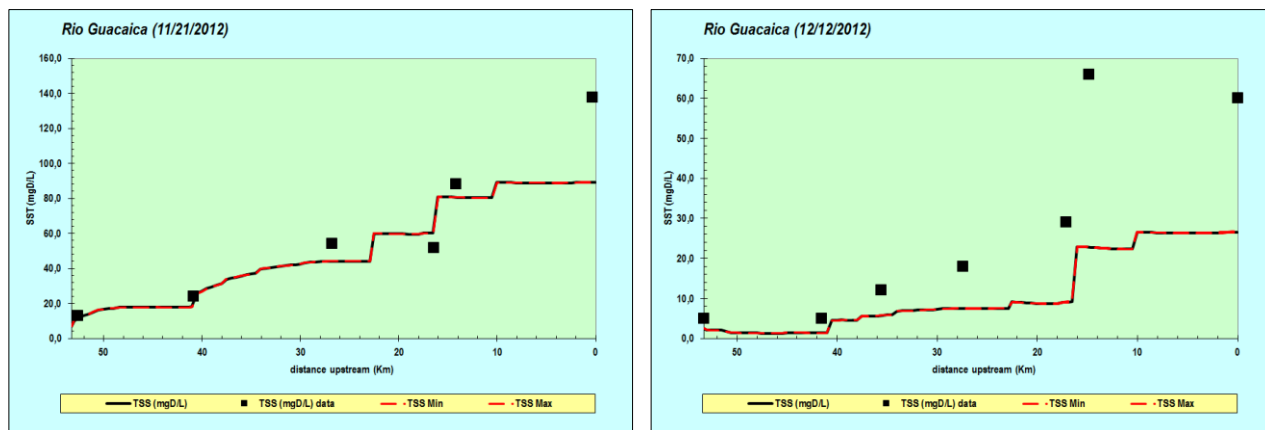


Figura 25. Calibración y confirmación de los sólidos suspendidos totales

La concentración de sólidos suspendidos totales de acuerdo a las campañas de monitoreo al inicio del tramo fue inferior a 10 mg/L. Sin embargo, la concentración de sólidos suspendidos empieza a aumentar en la corriente en ambos casos, esto se debe al aporte en carga de sólidos de los tributarios que se encuentran en el tramo evaluado, así como a los sólidos de carácter orgánico que llegan al río por escorrentía. Se observa que la concentración de los sólidos suspendidos totales en el río Guacaica se encuentra por debajo del promedio.

En cuanto a los resultados de la calibración y confirmación del modelo para los sólidos suspendidos totales, puede observarse dificultades en el ajuste de los datos, siendo más evidente en los resultados de la confirmación. En la Tabla 20 se presenta el cálculo de los porcentajes de error entre los datos medidos en campo y los resultados del modelo para la calibración y la confirmación de los sólidos suspendidos totales en el río Guacaica.

Tabla 20. Porcentaje de error en calibración y confirmación de los sólidos suspendidos totales

Puntos de Monitoreo	% Error calibración	% Error confirmación
San Pablo	48.08 %	51.40 %
Mangabonita	25.86 %	73.14 %
Belmira	No se midió	53.78 %
Estación CHEC	18.60 %	58.44 %
El Guineo	16.67 %	68.74 %
Lisboa	8.37 5	65.56 %
Km 41	35.24 %	55.76 %

Los resultados de la calibración y confirmación del modelo para los sólidos suspendidos totales presentan porcentajes de error considerables, en el caso de la confirmación en su totalidad se encuentran por encima del 50%, y solamente en el caso de tres estaciones en la calibración (Estación CHEC, El Guineo, Lisboa) el error estuvo por debajo del 20%. Nuevamente se hace evidente la necesidad de contar con monitoreos de la calidad del agua adicionales que permitan ajustar las constantes cinéticas de tal forma que se pueda minimizar el error actual.

### **6.3 Análisis del escenario de saneamiento**

A partir de la calibración y confirmación del modelo QUAL2Kw para el río Guacaica, se ingresaron los datos del escenario de saneamiento propuesto y descrito anteriormente en detalle para predecir el comportamiento de la corriente. A continuación se presentan los resultados y el análisis del modelo para 2 de los parámetros de calidad del agua más representativos (DBO rápida y sólidos suspendidos totales).

El escenario de modelación planteado permitió predecir la asimilación y/o degradación de los distintos parámetros físicoquímicos en la corriente, de esta forma se evaluó la respuesta del río para cuando la quebrada Olivares no sea la receptora de los vertimientos generados en los barrios del norte de la ciudad de Manizales y posteriormente descargue sus aguas en mejor estado en el río Guacaica, teniendo en cuenta que el escenario se evaluó tanto para tiempo seco como para tiempo de lluvia.

En las Figuras 26 y 27 se observan los resultados del modelo para el escenario planteado en términos de DBO rápida, se presentan nuevamente los resultados de la calibración y confirmación para un mejor análisis del escenario.

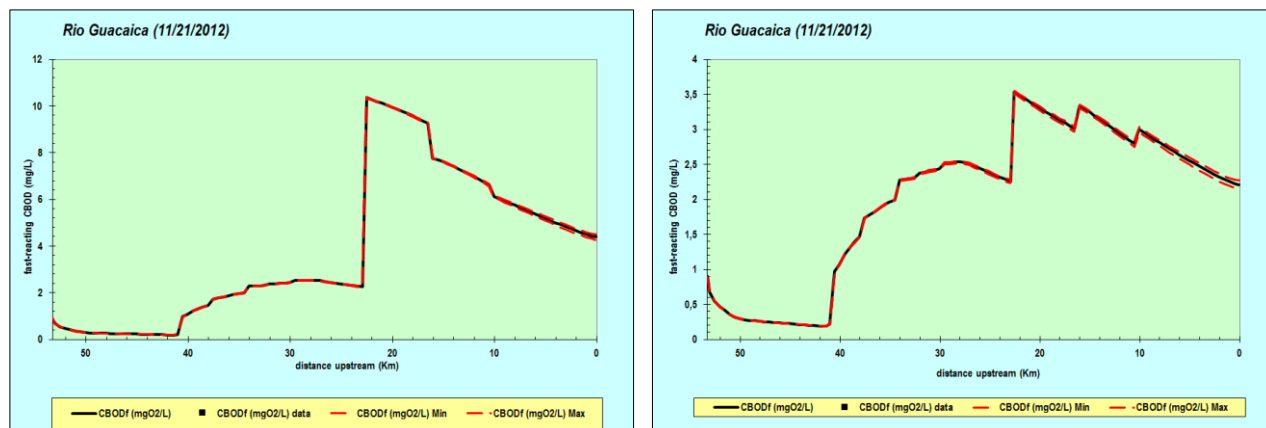


Figura 26. Calibración y escenario de saneamiento para tiempo seco de la DBO rápida

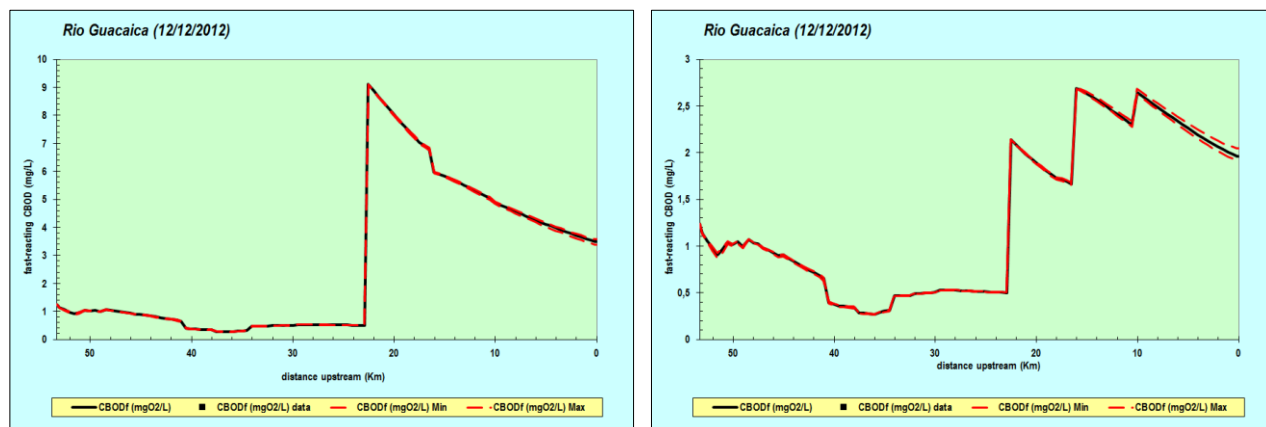


Figura 27. Confirmación y escenario de saneamiento para tiempo de lluvia de la DBO rápida

Al comparar los resultados de la calibración y la confirmación (estado actual) con los resultados del escenario planteado, se encuentra que actualmente la concentración de DBO rápida en el río Guacaica alcanza valores de 10 mg/L cuando es receptora de la quebrada Olivares, mientras que el saneamiento contemplado reducirá la concentración hasta valores menores de 4 mg/L en ambos casos.

En las Figuras 28 y 29 se observan los resultados del modelo para el escenario planteado en términos de los sólidos suspendidos totales (SST), se presentan nuevamente los resultados de la calibración y confirmación para un mejor análisis del escenario.

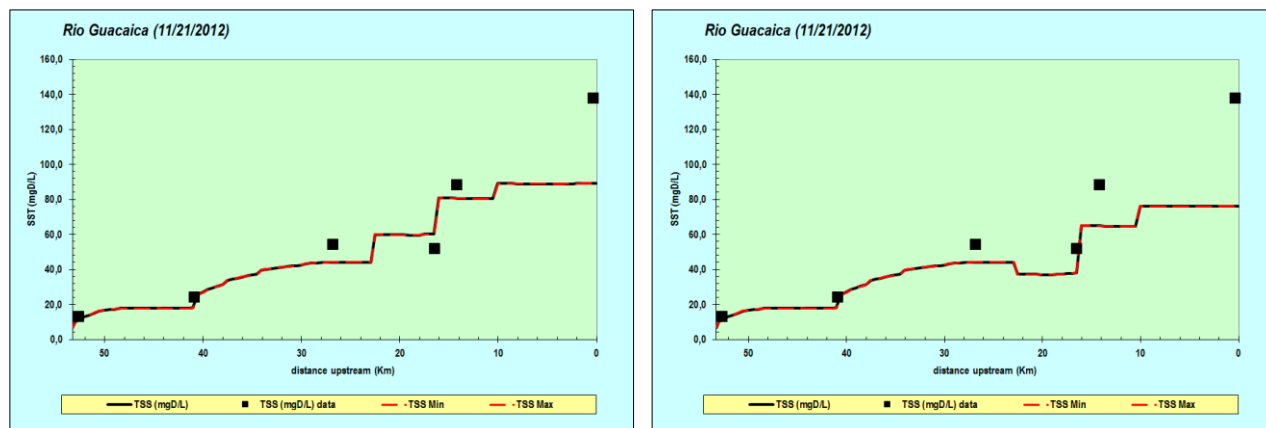


Figura 28. Calibración y escenario de saneamiento para tiempo seco de los SST

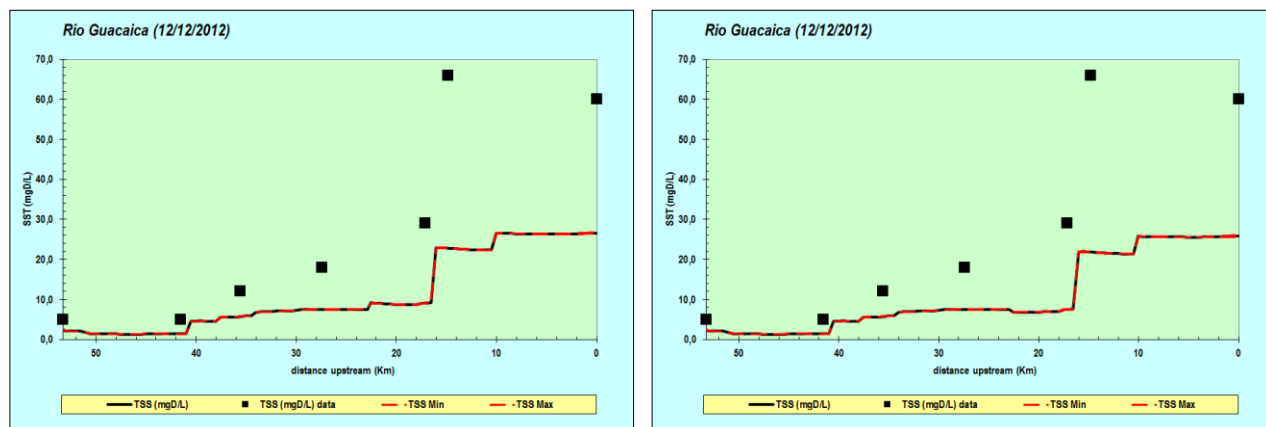


Figura 29. Confirmación y escenario de saneamiento para tiempo de lluvia de los SST

En el caso de los sólidos suspendidos totales, al comparar los resultados de la calibración y la confirmación (estado actual) con los resultados del escenario planteado, se tiene que actualmente la concentración de los SST en el tramo en el cual la quebrada Olivares desemboca en el río Guacaica, alcanza concentraciones de 60 mg/L en el caso del tiempo seco y 10 mg/L en el tiempo de lluvia, mientras que con el escenario planteado la concentración disminuirá hasta valores cercanos a 40 mg/L y 7 mg/L en tiempo seco y tiempo de lluvia respectivamente.

Como era de esperarse, la concentración de los contaminantes en la quebrada Olivares disminuirá notablemente y esto se verá reflejada también en el río Guacaica, puesto que la instalación de los colectores que recogerán las descargas puntuales que se realizan actualmente, canalizarán y conducirán las aguas residuales hasta el sitio donde se construirá la planta de tratamiento del municipio de Manizales.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

Las dos campañas de monitoreo realizadas en el río Guacaica y la información existente, permitieron contar con los datos de campo necesarios para implementar el modelo de calidad del agua QUAL2Kw y realizar su calibración y confirmación.

Los resultados permitieron evidenciar un tramo crítico sobre la corriente, el cual tiene problemas de contaminación desde su nacimiento debido a las actividades antrópicas que se realizan en la zona (cultivos de papa, ganadería y vertimientos de aguas residuales domésticas), sin embargo, el mayor impacto que se observa es en el punto en el cual el río recibe a la quebrada Olivares con una alta carga contaminante, lo cual ocasiona que los niveles de todos los contaminantes se incrementen considerablemente y deterioren la calidad del agua del río Guacaica en ese tramo.

En forma general, se puede decir que los resultados de este trabajo representan una línea base en términos de modelación de la calidad del agua para el río Guacaica, puesto que no existen experiencias previas de modelación ni se han realizado más campañas de monitoreo diferentes a las utilizadas para la implementación del modelo de calidad.

Se observó que los resultados obtenidos tanto en la calibración y la confirmación del modelo representaron aproximadamente las condiciones encontradas en las dos campañas de monitoreo realizadas en el año 2012. El modelo reprodujo en menor medida las condiciones en la parte alta y media de la corriente, por lo cual es necesario contar con campañas de monitoreo futuras que permitan realizar el ajuste de las constantes cinéticas encontradas.

Los resultados del modelo estuvieron influenciados por la información adicional que no fue recopilada en campo y que es necesaria para una correcta implementación del modelo: Constante de reaeración, constante cinética para la DBO filtrada, carbono orgánico disuelto, monitoreo fisicoquímico de tributarios y la identificación de vertimientos importantes sobre la corriente principal.

A partir de la comparación del escenario de simulación propuesto y comparando los resultados del modelo para el estado actual de la corriente (tiempo seco y tiempo de lluvia), se puede determinar que los beneficios sobre la calidad del agua del río Guacaica para el escenario de saneamiento planteado serían contundentes y se podría tener en un futuro un manejo urbanístico de la quebrada Olivares que permita mejorar no sólo la calidad del agua sino también el paisaje del sector y la calidad de vida de los habitantes de la ciudad.

El modelo de calidad del agua QUAL2Kw implementado en el río Guacaica, puede ser ajustado posteriormente a partir de la realización de otras campañas de monitoreo para ser consolidado como una herramienta confiable y eficaz para la autoridad ambiental, que contribuya a la planificación del recurso hídrico.

Se recomienda que las campañas de monitoreo realizadas para la implementación de modelos de calidad del agua, incluyan dentro de su planificación la revisión detallada de los datos de entrada del modelo de calidad, de tal forma que se realice el monitoreo de los parámetros necesarios y no se tenga que recurrir a suposiciones que puedan influenciar los resultados del modelo.

Para la correcta implementación del modelo de calidad del agua QUAL2Kw, se recomienda contar con la siguiente información que normalmente no es recopilada: características hidráulicas de la corriente por tramos (ancho, profundidad, velocidad, pendiente, etc.), parámetros y constantes cinéticas que permitan determinar la DBO lenta y DBO rápida (carbono orgánico disuelto, DBO filtrada,  $K_{DBO \text{ filtrada}}$ ), constantes de reaireación por tramos, identificación y caracterización de fuentes puntuales y difusas, georreferenciación de los puntos de monitoreo, estudio de trazadores por tramos (tiempo de viaje) y las variables meteorológicas del día en el que se realizó el monitoreo.

Adicionalmente se recomienda contar con una campaña de monitoreo realizada en tiempo seco para la calibración del modelo, y una campaña adicional para realizar la confirmación del mismo.



## 8 BIBLIOGRAFÍA

---

Área Metropolitana Valle de Aburrá. (2011). Red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburrá – Medellín en jurisdicción del Área Metropolitana Fase III

Arroyave D.M., Moreno A. A., Toro F.M., Gallego D.J., Carvajal L.F. (2012). Estudio del modelamiento de la calidad del agua del río Sinú, Colombia.

Castillo G. (2008). Modelos de calidad de aguas.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS. (1999). Modelo matemático de calidad de aguas RIOS.

CETESB (2002). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de Brasil. [www.cetesb.sp.gov.br/agua/rios/indice.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/rios/indice.asp). Índice de calidad del agua con fines de abastecimiento al público (IAP).

Chapra, S. C. (1997). Surface Water-Quality Modelling, The McGraw-Hill Companies. Inc., New York.

Chapra Steve and Pelletier Greg. (2008). QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1). A modeling framework for simulating river and stream water quality.

Chihhao Fan, Chun-Han Ko, Wei-Shen Wang. (2009). An innovative modeling approach using QUAL2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation.

Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Decreto 3930 de 2010

Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, D.C.: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Corporación Autónoma Regional del Cauca - CAR. (2012). Estudio de actualización del modelo de calidad del agua del río Palo 2011 tramo puente de Guachené – Bocas del Palo

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2007). Estudio Del Proceso De Reaireación en el Río Cauca Sectores La Balsa y Puerto Issacs.

Cristea, N. and Pelletier, G. (2005). Wenatchee River temperature Total Maximum Daily Load study. Publication number 05-03-011, Washington State Department of Ecology, Olympia, WA,

Cox B. A. A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers. (2003). The Science of the Total Environment. Vol. 314 –316, 303–334, 2003.

Danish Hydraulic Institute DHI. (1999). MIKE 11: Comprehensive 1-d dynamic flow model, [www.bossintl.com](http://www.bossintl.com)

Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental - Comisión Técnica de Prevención y Reparación de Daños Medioambientales. (2011). Análisis de Herramientas de Evaluación de la Difusión y Comportamiento de Agentes Químicos en el Marco de la Normativa de Responsabilidad Medioambiental. España, 2011

Fundación SANEAR y Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS. (2010). Modelación de la calidad del agua del Río Chinchiná. Manizales, Departamento de Caldas.

Garcia T., Pelletier G., Diaz J. (2009). Water quality simulation of the Chicamocha river, Colombia. An application of the QUAL2Kw Model. Ecological Modeling.

Heon, Chou and Ryong, Ha. (2010). Parameter optimization of the QUAL2K model for a multiple-reach river using an influence coefficient algorithm. Science of the Total Environment, 408, 1985–1991. 2010

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2004). Guía Para El Monitoreo y Seguimiento Del Agua. Bogotá.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2010). Estudio Nacional del Agua 2010.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2011). Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial.

Jiménez, A. A. (2000). Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. *Revista interdisciplinar de gestión ambiental*, 2(23), 12-19.

Kannel Pr, Lee S, Lee Ys Kanel Sr, Pelletier G. J. (2007). Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecol Model*, Vol. 202, 503 -517, 2007

Kannel, P.R., Lee, S., Kanel, S.R., Lee, Y. Ahn, K.-H. (2007). Application of QUAL2Kw for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati. *Environ. Monit. Assess.* 125, 201-217

Lozano G., Zapata M.A. y Peña L.E. (2003). Selección del modelo de calidad del agua en el proyecto “Modelación de corrientes hídricas superficiales en el departamento del Quindío”.

Metcalf & Eddy (1998). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw Hill. 3ª Edición.

N. Fernández, y F. Solano.(2008). Índices de Calidad y Contaminación del Agua, Pamplona: Universidad de Pamplona.

NOAA Research. National Oceanic & Atmospheric Administration. Disponible en internet: <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml>.

Ott, W. R.. (1978). Environmental indices: Theory and practice., Ann Arbor Science Publishers (ed), Michigan, 1978.

Pelletier, G. J., Chapra, S. C. (2003). QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality. Documentation and User's Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA. 2003.

Pelletier, G.j. Chapra, S. (2004). QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1). A modeling framework for emulating river and stream water quality. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA. 104 pp. 2004.

Pelletier, G. J., Chapra, S., TAO, H. (2005). QUAL2Kw - A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. Environmental Modelling & Software. Vol. 21, 419 -425, 2005.

U.S. Environmental Protection Agency EPA. (1988). Water Quality Analysis Simulation Program (WASP), version 6.0, draft: User's manual, Ambrose R., Corner E., Martin J., Wool T., U.S. Environmental Protection Agency – Region 4, Athens U.S.

Whitehead, P.E., William, R.J. and Lewis, D.R. (1997). Quality simulation along rivers (QUASAR), Part 1: Model theory and development science of the total environment, 194/195.447-456

Vera Puerto, I. L. (2007). Aplicación de técnica de optimización mediante algoritmos genéticos para calibración de modelo Qual2k como una aproximación a la modelación de la calidad del agua de los principales ríos de la zona urbana de Bogotá DC.

## **ANEXOS 1: FICHAS DE CAMPO DE LOS PUNTOS DE MONITOREO**

---

Tabla 1. Ficha de Campo Punto Monitoreo 1 - Río Guacaica



FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACIÓN DE MONITOREO:				OBSERVACIONES			
SAN PABLO				Tipo de aforo: Vadeo  Ubicado en el páramo de letras. La apariencia de la corriente es limpia. Sin embargo, se observan algunos elementos sólidos derivados de acción antrópica. Aguas arriba se presentan asentamientos humanos como la escuela y casas cercanas. En el área se encuentra varios fragmentos de bosque que enriquecen el paisaje.			
CORRIENTE:							
RÍO GUACAICA							
UBICACIÓN							
Coordenadas	Altura						
N 05° 08' 21.3"	3730 m. s. n. m.						
O 75° 20' 08.4"							
PARÁMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña (C)	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (μS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	21/11/2012	10:00 am	7.3	22.9	14	7	6.9
C2	12/12/2012	09:06 am	8.4	25.1	15.4	7.5	6.8
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							

Tabla 2. Ficha de Campo Punto Monitoreo 2 - Río Guacaica



FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACIÓN DE MONITOREO:				OBSERVACIONES			
RÍO BLANCO				Tipo de aforo: Vadeo  Ubicado en el páramo de letras. La principal área de drenaje de esta corriente es de Aguas de Manizales, allí se encuentra la casa de la familia que cuida el lugar. No hay cultivos, se está permitiendo que el terreno se recupere con especies nativas. Hay ganado en la zona.  Las rocas del lecho son lamosas.			
CORRIENTE:							
RÍO GUACAICA							
UBICACIÓN							
Coordenadas	Altura						
N 05° 07' 13.5"	3616 m. s. n. m.						
O 75° 22' 06.6"							
PARÁMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña (C)	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (μS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	21/11/2012	02:30 pm	6.7	37.4	14	7.1	7.1
C2	12/12/2012	12:00 m	6.7	44.5	16.2	8.5	6.81
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							



Tabla 3. Ficha de Campo Punto Monitoreo 3 - Río Guacaica



FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACIÓN DE MONITOREO:				OBSERVACIONES			
MANGABONITA				Tipo de aforo: Vadeo  El río se observa limpio, de un color ligeramente amarillo posiblemente por las características del suelo, no hay presencia de espumas ni malos olores, tampoco se observan basuras en las orillas. Se observa en la zona grandes plantaciones de pino y mucha actividad ganadera con suelos erosionados que han desencadenado deslizamientos.			
CORRIENTE:							
RÍO GUACAICA							
UBICACIÓN							
Coordenadas	Altura						
N 05° 08' 46.1"	2325 m. s. n. m.						
O 75° 24' 38.4"							
PARÁMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña (C)	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (μS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	21/11/2012	12:50 pm	7.5	54.2	16	12	7.3
C2	12/12/2012	10:30 am	8.3	62.3	17.5	13.6	7.4
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							



Tabla 4. Ficha de Campo Punto Monitoreo 4 - Río Guacaica



FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACIÓN DE MONITOREO:				OBSERVACIONES			
BELMIRA				Tipo de aforo: Vadeo  El río se observa limpio, no hay presencia de espumas ni malos olores, tampoco se observan basuras en las orillas. Se observa en la zona grandes plantaciones de pino y mucha actividad ganadera con suelos erosionados que han desencadenado deslizamientos			
CORRIENTE:							
RÍO GUACAICA							
UBICACIÓN							
Coordenadas	Altura						
N 05° 07' 48.1"	1938 m. s. n. m.						
O 75° 27'1.3"							
PARÁMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña (C)	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (μS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C2	12/12/2012	02:30 pm	8.44	81.7	17.8	14	7.9
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							

Tabla 5. Ficha de Campo Punto Monitoreo 5 - Río Guacaica



FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACIÓN DE MONITOREO:				OBSERVACIONES			
ESTACIÓN CHEC				Tipo de aforo: Vadeo / Suspensión  Ubicado por la ruta a Neira sobre la carretera. Se observan cultivos de plátano y suelos erosionados. No hay presencia de espuma ni malos olores aunque se observan algunos descoles de ARD de las viviendas a la orilla del río. Hay presencia de personas extrayendo material del río de manera artesanal.			
CORRIENTE:							
RÍO GUACAICA							
UBICACIÓN							
Coordenadas	Altura						
N 05° 08' 13"	1636 m. s. n. m						
O 75° 29' 46.9"							
PARÁMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña (C)	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (μS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	22/11/2012	07:25 am	7.75	99.3	18.9	15.3	7.9
C2	13/12/2012	07:20 am	7.7	92.2	19.7	15.5	8.1
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							

Tabla 6. Ficha de Campo Punto Monitoreo 6 - Río Guacaica



FICHA DE CAMPO							
<b>NOMBRE ESTACIÓN DE MONITOREO:</b>				<b>OBSERVACIONES</b>			
EL GUINEO				Tipo de aforo: SUSPENSIÓN  Ubicado en la vía a Santágueda por la quiebra de Vélez. En este sitio el río es bastante ancho en comparación con los puntos anteriores. Se observan cultivos de plátano y café. Se observan basuras en las orillas y extracción de material de arrastre de forma artesanal.			
<b>CORRIENTE:</b>							
RÍO GUACAICA							
<b>UBICACIÓN</b>							
Coordenadas	Altura						
N 05° 07' 43"	1237 m. s. n. m.						
O 75° 32' 58.2"							
PARÁMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña (C)	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (μS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	22/11/2012	11:00 am	7.6	149.2	25.8	18.2	7.7
C2	13/12/2012	09:35 am	8.05	160.4	26.9	19	7.7
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							

Tabla 7. Ficha de Campo Punto Monitoreo 7 - Río Guacaica



FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACIÓN DE MONITOREO:				OBSERVACIONES			
LISBOA				Tipo de aforo: Suspensión  Ubicado sobre la vía a la vereda Alto Lisboa. Se observa alta presencia de basuras en las orillas del río. No hay presencia de espuma pero si se perciben algunos olores. Se observan vertimientos de ARD y plantaciones de café y plátano.			
CORRIENTE:							
RÍO GUACAICA							
UBICACIÓN							
Coordenadas	Altura						
N 05° 07' 9.9"	1172 m. s. n. m.						
O 75° 33' 52.7"							
PARÁMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña (C)	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (μS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	22/11/2012	12:45 pm	7.15	168.9	26.1	19.5	7.6
C2	13/12/2012	11:30 am	8.03	163.7	28.2	20	7.8
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							

Tabla 8. Ficha de Campo Punto Monitoreo 8 - Río Guacaica



FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACIÓN DE MONITOREO:				OBSERVACIONES			
KM 41				Tipo de aforo: Suspensión  Se encuentra ubicado en la vía a Medellín sobre la carretera. No hay presencia de espumas ni malos olores. Se observa actividad ganadera y plantaciones de cítricos (mandarina y naranja).			
CORRIENTE:							
RÍO GUACAICA							
UBICACIÓN							
Coordenadas	Altura						
N 05° 06' 38.3"	868 m. s. n. m.						
O 75°39' 28.5"							
PARÁMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña (C)	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (μS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	22/11/2012	04:00 pm	7.22	168.6	25.8	22.2	7.5
C2	13/12/2012	02:30 pm	7.91	176.8	29.1	23.1	7.7
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							



Tabla 9. Ficha de Campo Punto Monitoreo 1 - Quebrada Olivares



FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACIÓN DE MONITOREO:				OBSERVACIONES			
BOCATOMA PLANTA NIZA				Tipo de aforo: Vadeo  Punto ubicado en la Reserva de Río Blanco antes del canal y el desarenador. Se observa una vegetación abundante y una corriente en buen estado.			
CORRIENTE:							
QUEBRADA OLIVARES							
UBICACIÓN							
Coordenadas		Altura					
N 05°03'57.9"		2293 m. s. n. m.					
O 75° 26' 53.1"							
PARÁMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña (C)	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (μS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	06/12/2012	09:00 am	7.85	65.8	15.5	11	8.02
C2	12/12/2012	09:13 am	7.7	75	17.6	12.9	7.7
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							

Tabla 10. Ficha de Campo Punto Monitoreo 2 - Quebrada Olivares



FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACIÓN DE MONITOREO:				OBSERVACIONES			
EL POPAL				Tipo de aforo: Vadeo  Punto ubicado en el sector del Popal donde se encuentra una estación medidora de caudal. Se observan areneros en la zona extrayendo material de arrastre de forma artesanal. También se observan descoles de alcantarillado, basuras en las orillas y se perciben malos olores.			
CORRIENTE:							
QUEBRADA OLIVARES							
UBICACIÓN							
Coordenadas		Altura					
N 05°3'48.6"		2000 m. s. n. m.					
O 75°28'25.9"							
PARÁMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña (C)	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (μS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	06/12/2012	10:45 am	7.68	76.5	20.6	16.4	7.2
C2	12/12/2012	11:42 am	7.6	96	20.5	17.8	6.8
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							

Tabla 11. Ficha de Campo Punto Monitoreo 3 - Quebrada Olivares





FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACIÓN DE MONITOREO:				OBSERVACIONES			
COMFAMILIARES				Tipo de aforo: Vadeo  Puno ubicado en la zona urbana de Manizales después del matadero. Se observan basuras en las orillas, el agua presenta alta turbiedad a la vista y se percibe un ligero mal olor.			
CORRIENTE:							
QUEBRADA OLIVARES							
UBICACIÓN							
Coordenadas		Altura					
N 05°03' 25"		2161 m. s. n. m.					
O 75° 29'28.9"							
PARÁMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña (C)	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (μS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	06/12/2012	01:00 pm	7.5	190	20	18	5.7
C2	12/12/2012	01:18 pm	7.2	236	20.6	18.6	4.6
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							



Tabla 12. Ficha de Campo Punto Monitoreo 4 - Quebrada Olivares

FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACIÓN DE MONITOREO:				OBSERVACIONES			
DESEMBOCADURA				<p>Tipo de aforo: Por las condiciones del sitio y el nivel de contaminación no fue posible la realización del aforo líquido.</p> <p>Se tomó la muestra pocos metros antes de la desembocadura de la quebrada Olivares en el río Guacaica y antes de mezclarse con la quebrada Santa Rita, la cual nace en Alto Bonito y termina en una cascada. La quebrada Olivares presenta una capa de espuma, el matiz de la corriente es cercano al color blanco.</p>			
CORRIENTE:							
QUEBRADA OLIVARES							
UBICACIÓN							
Coordenadas		Altura					
N		1400 m. s. n. m.					
O							
PARÁMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña (C)	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (μS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	06/12/2012	04:00 pm	8.42	306	20	18.8	6.0
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							

**ANEXOS 2: RESULTADOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS  
PARA LAS DOS CAMPAÑAS DE MONITOREO**

---

Tabla 13. Resultados Caracterización río Guacaica - Campaña 1

Parámetro	Unidades	San Pablo	Rio Blanco	Mangabonita	Estación Chec	El Guineo	Lisboa	Km 41
Caudal	m³/s	0.043	0.049	1.401	5.55	6.09	6.611	
Conductividad	µS/cm	27.7	68.1	63.7	99.3	149.2	168.9	168.6
Turbidez	NTU	2.0	7.3	4.8	22	24	31	60
Color real	U Pt-Co	40.7	45.25	34.98	33.14	23.97	26.17	27.64
Color aparente	U Pt-Co	63.78	50.39	40.12	82.67	43.78	41.58	104.42
pH	Unidades	7.16	7.11	7.34	7.54	7.60	7.15	7.22
Amonio	mg NH <sub>3</sub> -N/L	0.35	0.10	0.10	0.40	2.14	1.33	1.00
N Orgánico	mg N/L	0.10	2.53	0.12	0.81	1.06	1.17	0.95
Nitratos	mg NO <sub>3</sub> /L	0.40	1.37	1.17	0.72	0.71	0.04	1.11
Nitritos	mg NO <sub>2</sub> /L	7.3	4.1	4.0	11.6	117.9	134.4	251.3
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	10.29	27.54	19.66	39.19	54.15	53.69	57.48
Cloruros	mg Cl⁻/L	0.91	0.84	0.66	0.46	5.48	6.66	6.17
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	23.69	20.60	32.96	45.32	49.44	54.59	57.68
Oxígeno Disuelto	mg O <sub>2</sub> /L	6.9	7.1	7.30	7.92	7.71	7.60	7.50
DQO Total	mg O <sub>2</sub> /L	12.45	11.07	11.93	9.89	17.48	17.32	17.39
DQO Filtrada	mg O <sub>2</sub> /L	11.48	9.56	11.77	8.69	14.21	11.88	11.94
DBO <sub>5</sub> Total	mg O <sub>2</sub> /L	0.97	1.89	1.08	2.36	5.32	5.50	6.92
DBO <sub>5</sub> Filtrada	mg O <sub>2</sub> /L	0.88	0.32	0.18	2.34	2.57	2.84	2.57
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /L	7.52	6.84	6.59	8.25	8.48	18.00	31.71
Fósforo Total	mg P/L	0.05	0.06	0.08	0.22	0.22	0.20	0.44
Fósforo Inorgánico	mg P/L	0.02	0.02	0.04	0.04	0.20	0.15	0.25
Fósforo Orgánico	mg P/L	0.03	0.04	0.04	0.18	0.02	0.05	0.19
S Totales	mg/L	44	48	156	125	153	222	272
ST Fijos	mg/L	12	40	104	123	142	162	249

ST Volátiles	mg/L	32	8	52	2	11	60	23
SS Totales	mg/L	16	10	24	54	51.5	88	137.5
SS Fijos	mg/L	2	10	18	53	46.5	79	130.5
SS Volátiles	mg/L	14	0	6	1	5	9	7
Coliformes totales	UFC/100 ml	88	140	345	3,00E+06	2,00E+07	5,00E+06	6,00E+06
Coliforme fecales	UFC/100 ml	54	10	120	1,00E+06	6,00E+05	1,00E+06	7,00E+05

Tabla 14. Resultados Caracterización río Guacaica - Campaña 2

Parámetro	Unidades	San Pablo	Rio Blanco	Mangabonita	Belmira	Estación Chec	El Guineo	Lisboa	Km 41
Caudal	m <sup>3</sup> /s	0.03	0.07	0.39	0.88	2,45	4,27	6,65	
Conductividad	μS/cm	30.5	54.2	75.5	95.8	110.9	154.9	162.4	170.8
Turbidez	NTU	5.0	13	3.0	8.0	13	23	31	25
Color real	U Pt-Co	64.70	77.17	54.79	54.79	45.25	42.32	45.98	44.52
Color aparente	U Pt-Co	77.17	104.32	77.17	75.70	23.28	23.28	23.28	23.28
pH	Unidades	6.39	6.39	7.67	7.64	7.57	7.64	7.67	7.73
Amonio	mg NH <sub>3</sub> -N/L	1.14	1.34		1.26	0.66	2.47	2.65	1.82
N Orgánico	mg N/L	0.06	0.50	0.97		2.96	4.75	2.33	0.99
Nitratos	mg NO <sub>3</sub> /L	1.15	0.83	0.99	0.62	0.70	1.14	1.31	2.33
Nitritos	mg NO <sub>2</sub> /L	1.69	1.56	2.48	1.89	7.59	100.32	113.39	92.38
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	14.17	23.98	33.79	40.33	39.24	56.68	69.76	59.95
Cloruros	mg Cl-/L	1.40	1.40	1.80	1.69	1.26	22.06		54.15
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	9.36	14.56	23.92	34.32	36.40	49.92	50.96	54.08
Oxígeno Disuelto	mg O <sub>2</sub> /L	6.8	6.81	7.42	7.95	8.09	7.73	7.80	7.70
DQO Total	mg O <sub>2</sub> /L	10.84	8.40	13.70	9.99	11.69	27.64	28.44	21.45
DQO Filtrada	mg O <sub>2</sub> /L	10.09	7.60	10.85	6.73	6.38	20.80	19.45	19.95
DBO <sub>5</sub> Total	mg O <sub>2</sub> /L	0.88	1.27	1.01	1.01	0.29	15.56	15.61	12.83
DBO <sub>5</sub> Filtrada	mg O <sub>2</sub> /L	0.74	0.92	0.08	0.51	0.15	3.94	3.07	4.69
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /L	7.11	7.79	6.55	6.54	6.48	6.55	6.84	26.88
Fósforo Total	mg P/L	0.10	0.06	0.07	0.23	0.15	0.58	0.54	0.83
Fósforo Inorgánico	mg P/L	0.04	0.04	0.03	0.11	0.15	0.49	0.35	0.60
Fósforo Orgánico	mg P/L	0.06	0.02	0.04	0.13	0.00	0.09	0.19	0.23
S Totales	mg/L	44	46	104	78	142	168	180	226
ST Fijos	mg/L	22	44	80	40	92	86	164	170
ST Volátiles	mg/L	22	2	24	38	50	82	16	56
SS Totales	mg/L	8	2	5	12	18	29	66	60
SS Fijos	mg/L	0	2	1	8	3	15	51	46
SS Volátiles	mg/L	8	0	4	4	15	14	15	14

Coliformes totales	UFC/100 ml	400	10	248	171	2,00E+05	5,00E+06	1,00E+06	7.80E+07
Coliformes fecales	UFC/100 ml	365	10	150	165	2,00E+05	6,00E+05	3,00E+05	1.70E+07

Tabla 15. Resultados Caracterización Quebrada Olivares-Campaña 1

Parámetro	Unidades	Bocatoma Planta Niza	El Popal	Confamiliares	Desembocadura
Caudal	m <sup>3</sup> /s	0.4	0.84	1.09	
Conductividad	μS/cm	78.1	87.9	195.1	326.0
Turbidez	NTU	18	50	60	35
pH	Unidades	6.74	7.45	7.10	7.77
Amonio	mg NH <sub>3</sub> -N/L	1.58	1.25	3.62	11.56
N Orgánico	mg N/L	1.91	0.53	6.92	7.55
Nitratos	mg NO <sub>3</sub> /L	0.54	0.64	1.27	1.27
Nitritos	mg NO <sub>2</sub> /L	1.04	27.93	7.36	20.52
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	36.00	32.63	57.38	103.50
Cloruros	mg Cl-/L	2.34	1.40	8.33	14.97
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	34.32	28.08	36.40	53.04
Oxígeno Disuelto	mg O <sub>2</sub> /L	8.02	7.15	5.70	5.95
DQO Total	mg O <sub>2</sub> /L	8.26	22.95	126.88	94.27
DQO Filtrada	mg O <sub>2</sub> /L	4.16	14.78	95.15	78.29
DBO <sub>5</sub> Total	mg O <sub>2</sub> /L	0.28	6.36	71.51	48.16
DBO <sub>5</sub> Filtrada	mg O <sub>2</sub> /L	0.26	3.72	33.12	33.12
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /L	6.33	6.42	29.90	33.80
Fósforo Total	mg P/L	0.24	0.38	1.63	1.97
Fósforo Inorgánico	mg P/L	0.07	0.16	1.33	0.46
Fósforo Orgánico	mg P/L	0.17	0.22	0.30	1.51
S Totales	mg/L	90	228	266	198
ST Fijos	mg/L	78	172	170	144
ST Volátiles	mg/L	12	56	96	54
SS Totales	mg/L	28	120	126	68
SS Fijos	mg/L	28	92	66	14
SS Volátiles	mg/L	0	28	60	54
Coliformes totales	UFC/100 ml	83	3,00E+05	5,00E+07	4,00E+09
Coliformes fecales	UFC/100 ml	50	3,00E+05	4,00E+07	2,00E+08

Tabla 16. Resultados Caracterización Quebrada Olivares - Campaña 2

Parámetro	Unidades	Bocatoma Planta Niza	El Popal	Confamiliares
Conductividad	μS/cm	80.2	91.4	200.0
Turbidez	NTU	3.0	22	55
Color real	U Pt-Co	17.00	55.16	196.03
Color aparente	U Pt-Co	28.01	2899.50	6905.66
pH	Unidades	6.88	7.18	7.49
Amonio	mg NH <sub>3</sub> -N/L	3.52	2.15	2.00
N Orgánico	mg N/L	0.27	0.22	10.33
Nitratos	mg NO <sub>3</sub> /L	0.44	0.63	1.75
Nitritos	mg NO <sub>2</sub> /L	4.36	13.38	7.16
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	38.15	34.88	58.86
Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> /L	1.68	1.75	8.42
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	37.44	42.64	75.92
Oxígeno Disuelto	mg O <sub>2</sub> /L	7.67	6.78	4.56
DQO Total	mg O <sub>2</sub> /L	10.65	32.74	173.94
DQO Filtrada	mg O <sub>2</sub> /L	3.85	22.00	85.08
DBO <sub>5</sub> Total	mg O <sub>2</sub> /L	6.08	14.51	68.65
DBO <sub>5</sub> Filtrada	mg O <sub>2</sub> /L	3.21	10.52	37.81
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /L	6.19	6.34	28.73
Fósforo Total	mg P/L	0.08	0.31	1.75
Fósforo Inorgánico	mg P/L	0.06	0.28	0.38
Fósforo Orgánico	mg P/L	0.02	0.04	1.38
S Totales	mg/L	40	134	858
ST Fijos	mg/L	36	132	746
ST Volátiles	mg/L	4	2	112
SS Totales	mg/L	4	42	112
SS Fijos	mg/L	0	42	42
SS Volátiles	mg/L	4	0	70
Coliformes totales	UFC/100 ml	23	3,00E+06	2,00E+08
Coliformes fecales	UFC/100 ml	8	2,00E+05	6,00E+07



## **ANEXOS 3: RESULTADOS CALIBRACIÓN Y CONFIRMACIÓN PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS**

---

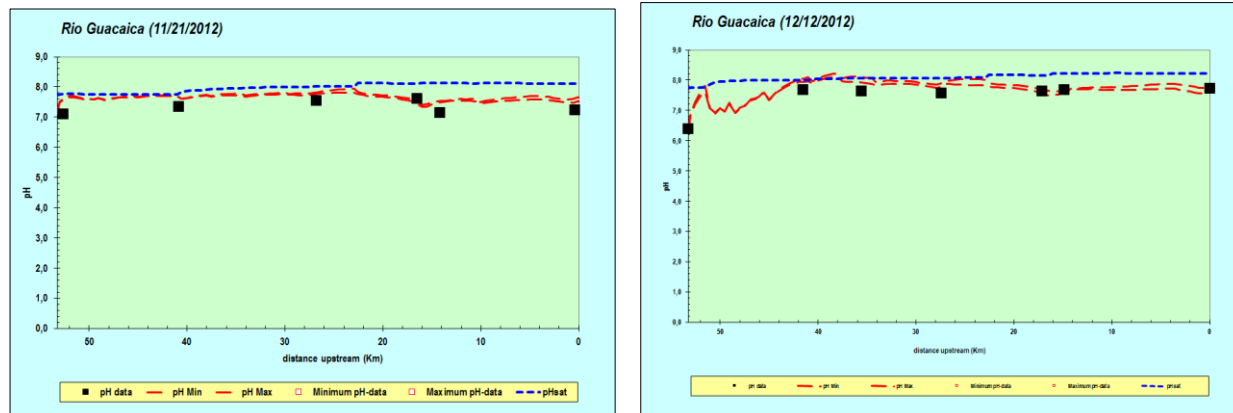


Figura 130. Calibración y confirmación del pH

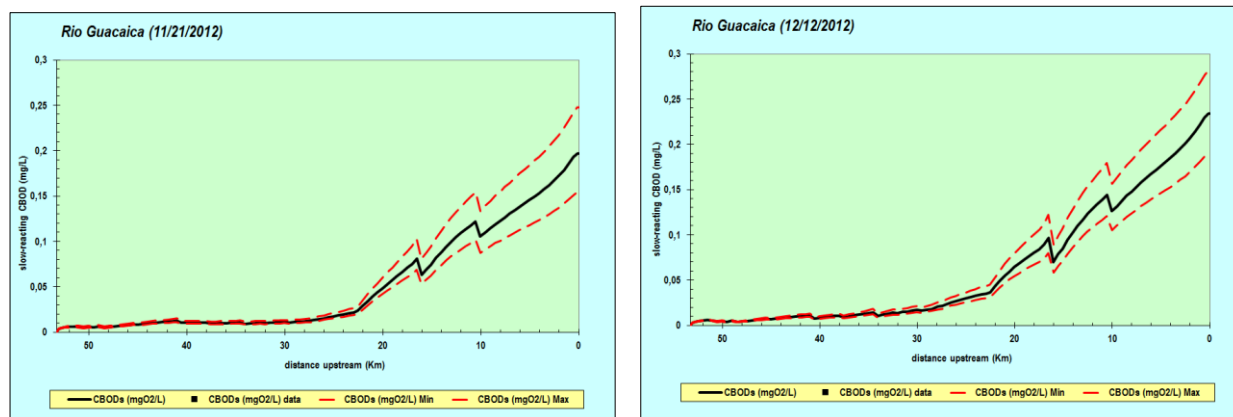


Figura 2. Calibración y confirmación de la DBO lenta

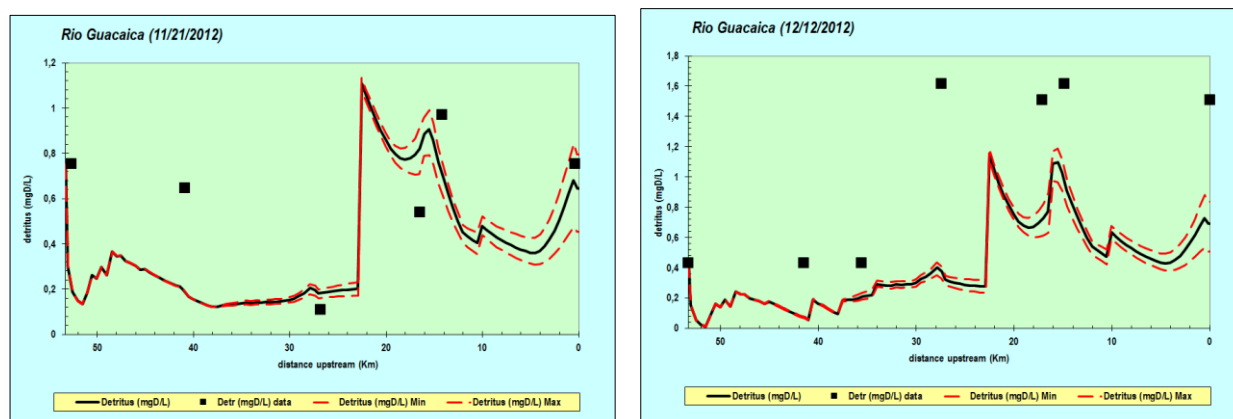


Figura 3. Calibración y confirmación de los Detritus

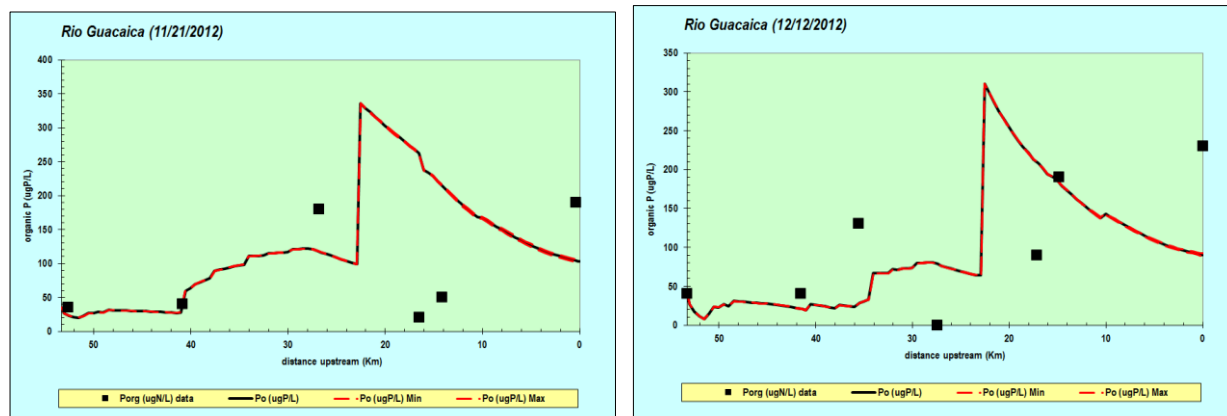


Figura 4. Calibración y confirmación del fósforo orgánico

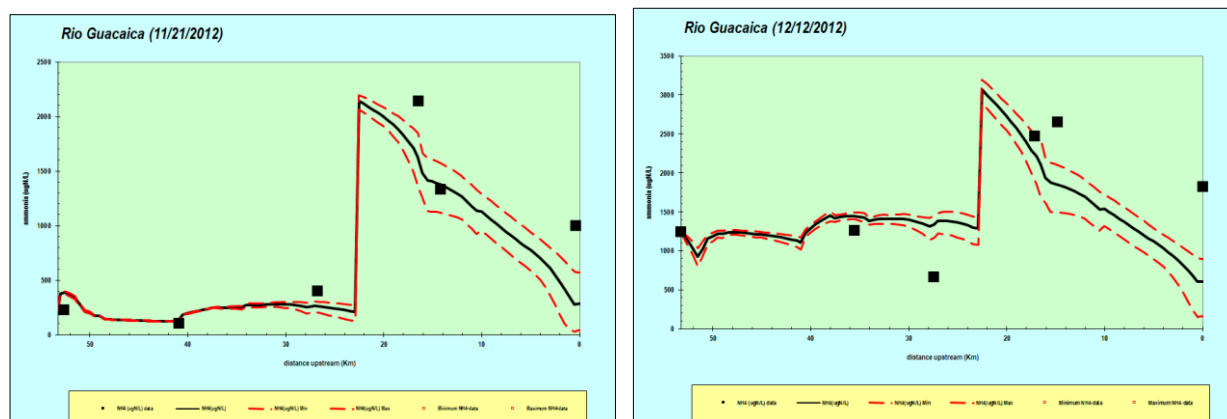


Figura 5. Calibración y confirmación del amonio

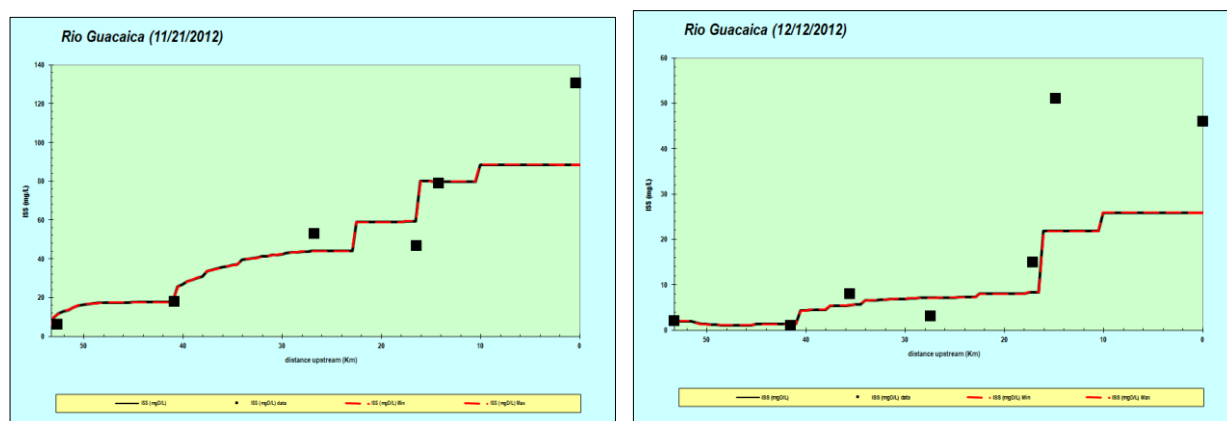


Figura 6. Calibración y confirmación de los sólidos suspendidos inorgánicos

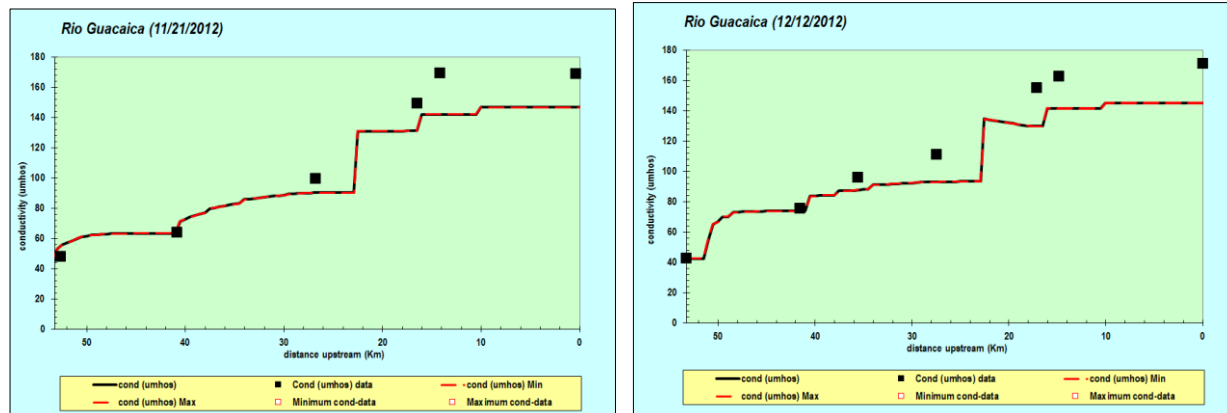


Figura 7. Calibración y confirmación de la conductividad

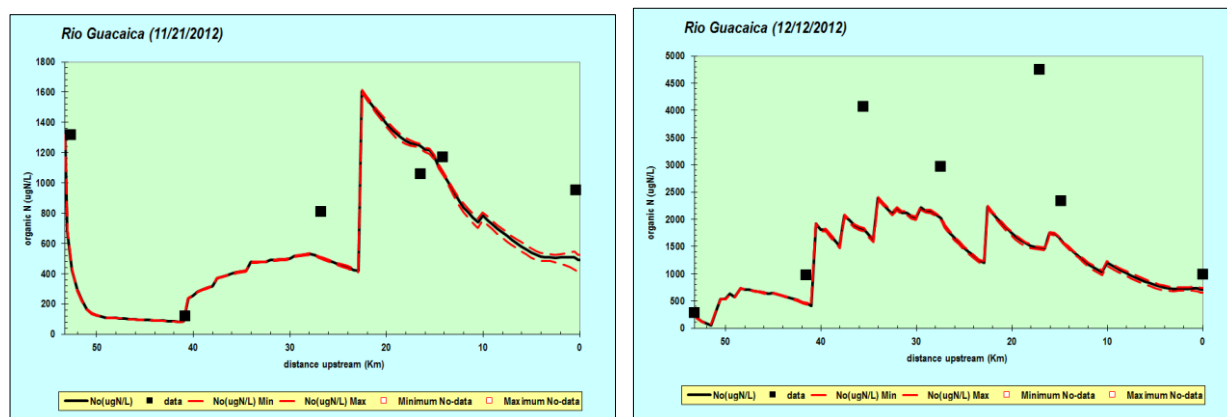


Figura 8. Calibración y confirmación del nitrógeno orgánico

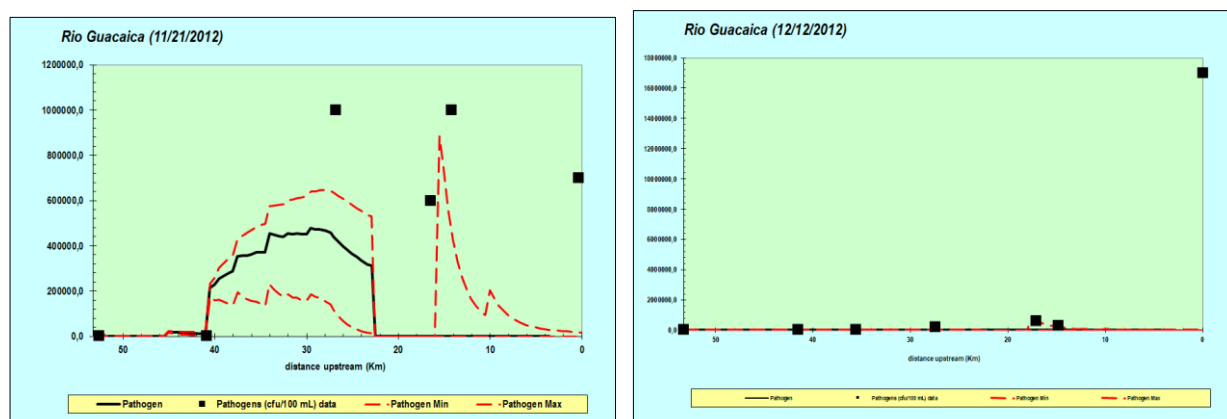


Figura 9. Calibración y confirmación de las coliformes fecales